

Olli Tuoriniemi

WQ-ulokepalkin mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

11.11.2016

Tekijä(t) Otsikko	Olli Tuoriniemi WQ-ulokepalkin mitoitus
Sivumäärä Aika	106 sivua + 8 liitettä 11.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Aarne Seppänen Osastopäällikkö Fia Inkala Päärakennesuunnittelija Juhani Syrjä
<p>Tämä insinööryö tehtiin Ramboll Finland Oy:lle. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa erityisesti WQ-ulokepalkkien mitoitukseen tarkoitettu laskentaohjelma. Monipuolisesta ja laajasta aiheesta huolimatta pyrkimyksenä oli suunnitella mahdollisimman käyttäjystävällinen ja selkeä laskentapohja suunnittelijoiden käyttöön. Kirjallisen työn ensisijainen tarkoitus on toimia laskentaohjelman käyttöä tukevana käsikirjana.</p> <p>Tuloksena saatiin laaja laskentapohja, joka mitoittaa WQ-ulokepalkin perustuen eurokoodin ohjeisiin, teräsrakenneyhdistyksen eurokoodien pohjalta tuottamaan teräsnormikorttiin sekä Ruukin Hitsatut Profiilit -käsikirjan ohjeisiin.</p> <p>Erityistä huomiota työssä annettiin mitoittavien voimasuureiden laskemiselle, taipumavii- van differentiaaliyhtälöiden käsittelemiselle sekä palotilanteessa teräksen lämpötilan kehittymiselle ajan funktiona palosuojattuna ja palosuojaamattomana.</p> <p>Tutkimusmenetelminä insinööryön toteuttamisessa olivat erityisesti kirjalliset lähteet. Lisäksi aiheen tiimoilta haastateltiin asiantuntijoita.</p> <p>WQ-palkki on pohjoismainen keksintö, ja näin ollen se on suosittu pohjoismaisessa rakentamisessa. Muualla Euroopassa WQ-palkkeja ei käytetä juuri ollenkaan mistä johtuen esimerkiksi eurokoodin mitoitusohjeet on esitetty sellaisessa muodossa, ettei niitä ilman soveltamista voi suoraan hyödyntää WQ-palkin mitoituksessa. Ruukin Hitsatut Profiilit -käsikirja sekä teräsrakenneyhdistyksen tuottama teräsnormikortti käsittelevät aihetta eurooppalaisia julkaisuja yksityiskohtaisemmin.</p>	
Avainsanat	WQ-palkki, Ulokepalkki, WQ-ulokepalkin mitoitus, WQ-palkin taipuma, WQ-palkin palomitoitus

Author(s) Title	Olli Tuoriniemi Structural Design of Cantilever WQ-beam
Number of Pages Date	106 pages + 8 appendices 11 November 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Aarne Seppänen, Senior Lecturer Fia Inkala, Project Manager Juhani Syrjä, Design Manager
<p>This engineer's thesis was assigned by Ramboll Finland Co. The aim of the thesis was to design and implement a special calculation worksheet to be used for the design of a WQ cantilever beam. In spite of the multifaceted and broad topic, the objective was to formulate a calculation worksheet that would be as clear and user-friendly as possible. The primary goal of this study is to serve as a supporting manual for the calculation worksheet.</p> <p>The end result of the study is an extensive calculation worksheet which enables the user to design a WQ cantilever beam based on the Eurocode instructions, the steel design standards issued by the Finnish Constructional Steelwork Association and the Ruukki Welded Profiles Handbook.</p> <p>In this thesis, particular attention is paid to the calculation of the designing force variables and the processing of the differential equations of the deformation line, as well as the generation of heat in a fire situation, both with fire retardant treatment and without, as a function of time.</p> <p>The research was conducted through analysis of source literature and interviews with experts.</p> <p>The WQ beam is a Nordic invention and therefore has been popular within the field of construction in the Nordic countries alone. Elsewhere in Europe the WQ beam is rarely used. As a result, the Eurocode design instructions are presented in such a form that they are not directly applicable for designing a WQ beam. The Ruukki Welded Profiles Handbook and the FCSA Steel Design Standards publication discuss this topic in more detail than any other European sources.</p>	
Keywords	WQ beam, Cantilever beam, Structural design of cantilever WQ beam, Deformation of WQ beam, Structural fire design of WQ beam

Alkusanat

Esitän suurimmat kiitokseni kaikille niille, jotka ovat osaltaan olleet apuna tämän insinööriyön laatimisessa. Ramboll Finland Oy tarjosi erinomaiset puitteet työn suorittamiseen. Kiitän työni ohjaajia diplomi-insinööri Fia Inkalaa sekä diplomi-insinööri Juhani Syrjää.

Erityisen suuret kiitokset esitän isälleni tekniikan tohtori Juha Tuoriniemelle suuresta avusta matemaattisten ja fysikaalisten ongelmien ratkaisemisessa. Suurta apua ja motivaatiota erilaisten ongelmien ratkaisemiseen olen saanut myös kollegaltani ja kurssikaveriltani Joonas Salolta. Kaikkia lähimmäisiäni kiitän kärsivällisyydestä pitkiksi venyneiden työpäivien suhteen.

Oppilaitoksen puolelta kiitän opinnäytetyöni ohjaajaa lehtori Aarne Seppästä. Teräsrakenteiden suunnittelua käsittelevät kurssit herättivät kiinnostuksen teräsrakenteiden suunnitteluun ja kursseilta saatujen oppien varjolla tämän insinööriyön aiheen valitseminen oli helppoa. Lisäksi haluaisin kiittää rakenteiden mekaniikan yliopettajaa Harry Böhlingiä rakenteiden mekaniikan esimerkkitehtävien laajasta tarjonnasta sekä johdonmukaisesta ja innostavasta opetuksesta, joka herätti kiinnostuksen alaa ja erityisesti rakenteiden mekaniikkaa kohtaan. Käyttämiesi opetusmetodien tulisi toimia esimerkkinä alan opetuksessa.

Lopuksi haluaisin osoittaa erityiskiitokset ohjaajalleni Aarnelle työni ohjaamisesta työtä varjostavista ikävistä olosuhteista huolimatta.

Taipaleensa tehtyään jätti surun suuren ja sydämeen tuskan. Olemme ohikulkijoita. Murheet syntyvät suurina ja ajan myötä hiljenevät. Vaan pieninä syntyvät suuret ilot ja kasvavat, ne kasvavat ja aika ne kultaa.

Muistoasi kunnioittaen.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	WQ-palkki	3
2.1	Toimintaperiaate	3
3	Poikkileikkausluokka ja sen merkitys	6
3.1	Johtopäätökset	8
3.2	Efekttiivinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4	9
4	MRT-mitoitus poikkileikkausluokassa 1–3	11
4.1	Alalaipan poikittainen taivutus	11
4.2	Taivutuskestävyys taivutukselle y-akselin suhteen	12
4.3	Plastinen leikkauskestävyys	14
4.4	Vääntö ja väännön aiheuttama lisäleikkausvoima	16
4.5	Leikkauslommahtaminen	18
4.6	Palkkia rasittavien voimasuureiden yhteisvaikutus taivutuskestävyyteen	21
4.6.1	Taivutuskestävyys ilman leikkauslommahduksen vaikutusta	21
4.6.2	Taivutuskestävyys ja leikkauslommahduksen vaikutus	24
4.6.3	Johtopäätökset	24
4.7	Kriittisen pisteen puristus	26
5	Käyttörajatilan tarkastelut	29
5.1	Kriittinen piste	29
5.1.1	Pinnanvääristymisenergiaperiaate rajatilajännityksen tarkastelussa	29
5.1.2	Kriittisen pisteen käyttörajatilan jännitykset (von Mises)	33
5.2	Taipumaviivan differentiaaliyhtälö	35
5.3	Ulokepalkin taipuma	38
5.3.1	Reunaehdot taipumaviivalle	43
5.3.2	Taipuman muodostus ja superpositio	43
5.3.3	Johtopäätökset	46
6	WQ-palkin palomitoitus kriittisen lämpötilan mukaan	48
6.1	Poikkileikkausluokan laskenta palotilanteessa	48
6.2	Palotilanteen kuormat	48

6.3	Palolle altistuvat osat ja hyväksikäyttöaste palotilanteessa	49
6.4	Kriittinen lämpötila	50
6.5	Palosuojaamattoman teräksen lämpötila ajan funktiona	51
6.6	Palosuojamateriaalit lyhyesti	56
6.6.1	Palosuojamaali	57
6.6.2	Mineraaliruiskutus	57
6.6.3	Betoni	57
6.7	Palosuojamaalatun teräksen lämpötila ajan funktiona	58
6.8	Palosuojaaruiskutetun teräksen lämpötila ajan funktiona	62
6.9	Johtopäätökset teräksen lämpötilasta ja palosuojauksesta	64
7	WQ-ulokepalkkilaskurin käyttö	72
7.1	Lähtötiedot	72
7.2	Laskentapohjan tulokset	79
7.2.1	Tuloksien tulkitseminen	79
7.2.2	Poikkileikkausluokan korottaminen	80
7.2.3	Alalaipan kestävyys	80
7.2.4	Leikkauslommahdus	80
7.2.5	Taivutuskestävyys	81
7.2.6	Leikkauskestävyys	81
7.2.7	Käyttörajan jännitykset	81
8	WQ-palkin pulttiliitos kannakelevyihin	82
8.1	Voimien jakaantuminen pulttiryhmässä	93
8.1.1	Johtopäätökset liitoksen mitoituksesta	101
9	Pohdintaa	103
9.1	Parannusehdotukset	103
9.1.1	Epäsymmetrisen reunapalkin jäyhyysmomentin tarkempi laskenta	104
9.1.2	Ontelolaatan pään kestävyys	104
9.2	Tulevaisuudennäkymiä	105
	Lähteet	106

Liitteet

Liite 1. Plastisen tilan neutraaliakseli ja tasapainoisen poikkileikkauksen määrittäminen

Liite 2. Plastinen taivutusvastus suorakaiteelle ja WQ-palkille

Liite 3. Taipumaviivan lauseke ja taipumaviivan derivaatta

Liite 4. Taipumaviivan differentiaaliyhtälöt ulokepalkille

Liite 5. Pistevoiman vaikutus taipumaan, yhtälö käänteisestä suunnasta

Liite 6. Taipumaviiva yhdessä kuvaajassa WQ- palkin kentän ja ulokkeen osalta

Liite 7. WQ-ulokepalkkilaskurin raportti

Liite 8. Kannakelevyliitoksen laskentarataportti

Lyhenteet

t	Levyosan paksuus, ellei toisin mainita
Alaindeksi w	Englanninkielen sanasta web, jolla tarkoitetaan uumaa
Alaindeksi f	Englanninkielen sanasta flange, jolla tarkoitetaan laippaa
Alaindeksi Rd	Resistance design, eli mitoituskestävyys
Alaindeksi Ed	Effect of action design, eli mitoittava kuormitus
Alaindeksi k	Sanasta karakteristinen, kuormituksen yhteydessä tarkoitetaan ominaiskuormia. Englanninkielessä characteristic
Alaindeksi pl	Viittaa plastisen tilan jännitys jakauman mukaisiin arvoihin
Alaindeksi el	Viittaa kimmoisen tilan jännitys jakauman mukaisiin arvoihin
Alaindeksi cr	Englanninkielen sanasta critical, jolla tarkoitetaan kriittistä
Alaindeksi b	Englanninkielen sanasta buckling, jolla kestävyysyden yhteydessä tarkoitetaan lommahdusta
Alaindeksi p	Englannin kielen sanasta plate, jolla tarkoitetaan levyä
c	Ominaislämpökapasiteetti. c on yleisesti fysiikassa ominaislämpökapasiteetille käytetty tunnus, englanniksi specific heat capacity
E	Materiaalin kimmokerroin. Kuvaa kappaleen elastisuutta, englanniksi elastic modulus tai young's modulus
f _y	Teräsosan myötöraja, missä y viittaa sanaan yield eli myötö
ψ	Tämän insinööriyön yhteydessä reunajännityksien suhde

1 Johdanto

Ramboll Finland Oy:llä ei aikaisemmin ole ollut WQ-ulokepalkeille tarkoitettua suunnittelutyökalua, joka olisi ollut yleisesti käytössä. Tämän sijaan usealla suunnittelijalla on omia laskupohjia omassa käytössä. Usein tämänkaltaiset laskupohjat ovat luonteeltaan sellaisia, että niiden ulkopuolinen käyttö vaatii huomattavissa määrin perehtymistä. Näin ollen usein muiden suunnittelijoiden laatimien laskentapohjien käytön kannattavuuden kynnyks ei ylity, vaan laskenta delegoidaan laskupohjan laatijan harteille.

Tämän insinööriyön yhtenä suurimpana teemana oli juurikin selkeys ja käytettävyys. Onkin erinomaisen tarkoituksellista, että käyttäjä pystyy aloittamaan mitoittamisen miltei heti laskupohjan avattuaan. Laskupohjan sisältämät ohjeet pyrkivät neuvomaan käyttäjää niissä tilanteissa, missä käyttäjän määrittämien alkuarvojen vaikutus laskennassa ei ole yksiselitteinen. Lisäksi insinööriyön kirjallinen osa laadittiin palvelemaan ensisijaisesti laskentapohjan käyttäjää, mutta myös ulkopuolista suunnittelijaa, joka tarvitsee aiheeseen liittyvää tietoa.

Laskentapohjan laatimisessa käytettiin lähdemateriaalina eurokoodin ohjeita, teräsrakenneyhdistyksen laatimaa teräsnormikorttia WQ-palkkien suunnittelulle sekä Ruukin Hitsatut Profiilit -käsikirjan ohjeita.

Erityistä huomiota lopullisessa laskuohjelmassa annettiin mitoittavien voimasuureiden laskemiselle, taipumaviivan differentiaaliyhtälöille sekä teräksen lämpötilan kehitykselle palosuojattuna sekä ilman palosuojauksia. Käytettävissä olevan lähdemateriaalin puitteissa WQ-palkin kestävyysrajojen selvittäminen oli yksiselitteistä ja helppoa, sillä tarvittavat laskentakaavat löytyvät useasta lähteestä. Laskentapohjan näkökulmasta itse mitoituksen osalta suurin haaste oli ohjelmoida laskentapohjaan kaikki mahdolliset tapaukset, mitkä tulee huomioida eri tilanteissa. Jotta nämä ehdot toteutuisivat, tarvittiin useita kymmeniä toisistaan riippuvaisia jos-lauseita.

Sama ongelma muodostui koko laskentaohjelman suurimmaksi haasteeksi. Mitä monipuolisemmat kuormitustapaukset ovat mahdollisia, sitä enemmän tästä seuraavia erikoistapauksia syntyy. Näiden tapauksien kartoitus ja huomioon ottaminen vaativat paljon ohjelmointia.

Oma henkilökohtainen kiinnostus taipumaviivan differentiaaliyhtälöitä kohtaan rajasi yhdeksi erityistä huomiota saaneeksi aiheeksi nimenomaan taipuman tarkastelut. Tuloksena tämän aiheen osalta syntyi palkin taipumaa käsittelevä osio, jossa kaikkien laskentaohjelmassa määritettyjen kuormien mukaiset kuormitustapaukset on otettu huomioon. Kuormitukset voidaan vapaasti määritellä vaikutusalueita myöten, jonka pohjalta kehitetty joukko jos-lauseita muodostaa kulloisenkin kuormitustapauksen. Johdattamalla taipumaviivan differentiaaliyhtälöt yleisessä muodossa kaikkien mahdollisten kuormitustekijöiden vaikuttaessa mahdollistetaan yksi yhtälö, johon sijoittamalla kulloisenkin kuormitustapauksen kuormitustekijät saadaan taipumalle arvot $x:n$ funktiona.

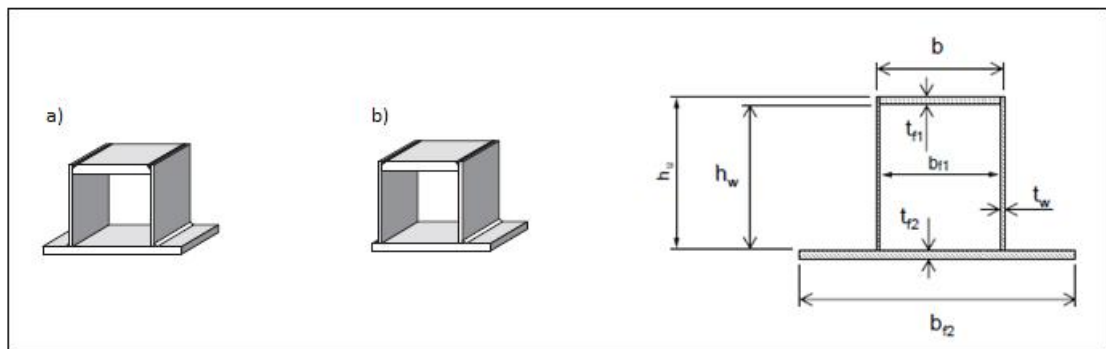
Toiseksi omasta näkökulmasta erityisen kiinnostavaksi aiheeksi muodostui teräksen lämpötilan nousu standardipalossa. Laskentaohjelman teräksen lämpötilan laskenta perustuu teräsrakenneyhdistyksen varmennettuihin käyttöselosteisiin palosuojainten osalta. Suojaamattoman teräksen lämpötilan nousu perustuu eurokoodin antamiin ohjeisiin. Oppimisen kannalta tätäkin aihetta pyrittiin lähestymään siten, että lopputulos olisi hieman tarkempi tai muilta ominaisuuksiltaan parempi kuin aikaisemmin käytetyt menetelmät. Lämpötilankehityksen osalta tämä toteutettiin tarkastelemalla teräksen ominaislämpökapasiteetin ja teräksen lämpötilan välistä relaatiota. Aihetta käsittelevistä kirjallisista lähteistä poiketen laskentapohja ei tyydy käyttämään ominaislämpökapasiteetille vakioarvoa, vaan tämäkin suure on lämpötilasidonnainen. Tämän seikan toteuttaminen käytännössä osoittautui suureksi haasteeksi ja selittää osaltaan, miksi useissa lähteissä ominaislämpökapasiteetin arvo on korvattu vakiolla.

Viimeisenä WQ-palkin mitoitusta käsittelevänä asiana tässä insinööriydessä otetaan kantaa pilarin ja WQ-palkin väliseen kannakelevyliitokseen. Erityisesti huomiota annettiin osiolle, missä esitetään mahdollinen tapa lähestyä liitoksen mallintamista lujuusopin sekä statiikan keinoin.

Tämän lisäksi tähän työhön koottiin joukko erilaisia ohjeita, joiden perusteella työn toiminnallisena tuloksena syntyneen WQ-palkkilaskurin käyttö olisi mahdollisimman helppoa ohjelman käyttöön tutustuvalla suunnittelijalla.

2 WQ-palkki

WQ-palkki on konepajalla levyateriaalista hitsaamalla valmistettava teräspalkki. Käytännössä leveään alalaippaan hitsataan a-mitaltaan uuman paksuutta vastaavalla pienenahitsillä uumat, sekä saman vahvuisella v-hitsillä hitsataan ylälaippa uumien yläreunojen väliin. Kuvassa 1 on esitetty WQ-palkin kokoonpano. WQ-profiilien yleisin käyttökäyttö on erilaisten rakennuksien välipohjarakenteet. WQ-palkin etuna voidaan pitää sitä, että se ei kasvata välipohjan rakennekorkeutta. Tämä johtuu siitä, että palkki valmistetaan yleensä välipohjan korkuisena, jolloin palkki jää piiloon rakenteeseen. Tämä mahdollistaa muiden asennuksien kannalta työtä helpottavat sileät pintarakenteet. Staattisten kuormien kantokyky optimoidaan mukauttamalla profiilin levypaksuudet vallitsevan tilanteen mukaisiksi. WQ-palkin toiminta välipohjarakenteessa perustuu sen leveään alalaippaan, joka kannattelee välipohjaa. Tämä johtaa siihen, että ainoastaan palkin alalaippa jää välipohjarakenteen ulkopuolelle. Palomitoitusta ajatellen tästä on etua, sillä näin ollen vain palkin alalaippa joutuu palotilanteessa palolle alttiiksi. [1][2.]

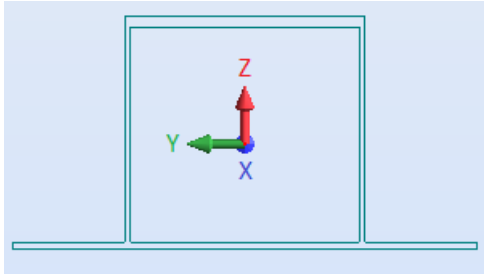


Kuva 1. a) esittää symmetristä WQ-palkkia. b) kuvaa epäsymmetristä WQ-palkkia [2.]

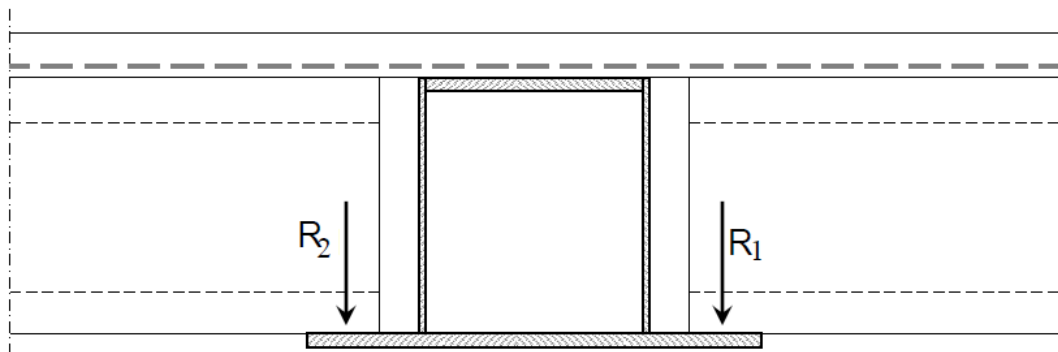
2.1 Toimintaperiaate

WQ-palkin staattisten kuormien kantokyky perustuu leikkausvoimakapasiteetin osalta palkin uuman leikkausvoimakapasiteettiin ja taivutuksen osalta kestävyys perustuu puristettuun ylälaippaan sekä vedettyyn alalaippaan. Välipohjarakenteena hyvin yleisesti käytetyt ontelolaatat tukeutuvat WQ-palkin leveään alalaippaan. Kuormien vaikutuspisteen katsotaan olevan ontelolaattojen tukipinnan puolivälissä, jonka seurauksena kuormitus on WQ-palkin y-akselin (kuva 2) suuntaisen painopisteen suhteen epäkeskinen (kuva 3). Epäkeskisen kuormituksen seurauksena palkin alalaippaan kohdistuu

poikittaista taivutusta. Tämän lisäksi WQ-palkki altistuu vääntömomentin aiheuttamille rasituksille. Väännön sekä poikittaisen taivutuksen vaikutusta käsitellään sille varatussa luvussa erikseen. [1.]

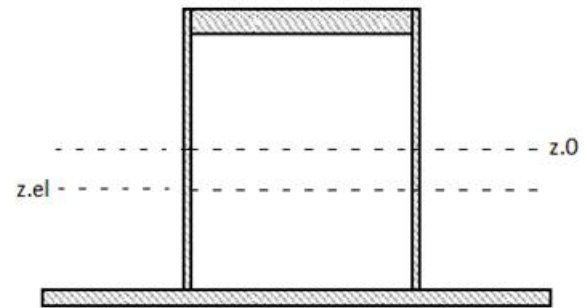


Kuva 2. WQ-palkin koordinaatisto



Kuva 3. Ontelolaatan aiheuttama epäkeskinen kuormitus [1.]

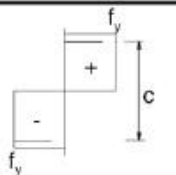
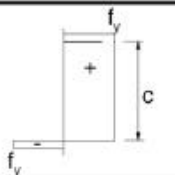
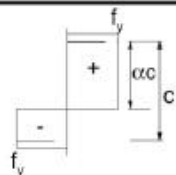
Ulokepalkin tapauksessa ulokkeen viereisen tukipisteen jälkeen palkin alalaippa muuttuu puristetuksi ja ylälaippa vedetyksi. Yleisesti suositellaan, että WQ-palkki olisi tasapainotettu siten, että sen elastisen tilan sekä plastisuusteorian mukaiset neutraaliakselit sijaitsisivat mahdollisimman lähellä toisiaan (kuva 4). Koska plastisuusteorian mukainen neutraaliakselin korkeus on pinta-alan ja rajajännityksen funktio, edellyttää tämä käytännössä ylälaippaan verrattuna ohuempaa alalaippaa. Tämä ajattelu johtaa tasapainoiseen poikkileikkaukseen. Tapauksen laskenta on esitetty liitteessä 1. Yksiaukkoisen WQ-palkin tapauksessa onkin optimaalista, että puristettu ylälaippa on alalaippaan nähden hieman paksumpi ja näin ollen vähemmän altis lommahtamaan puristuksesta. Ulokepalkin tapauksessa tilanne muuttuu hivenen konstikkaammaksi, sillä alalaippa ei ole kauttaaltaan vedetty.



Kuva 4. z_0 kuvaa plastisen tilan neutraaliakselia, z_{el} kimmoisan tilan neutraaliakselia [2.]

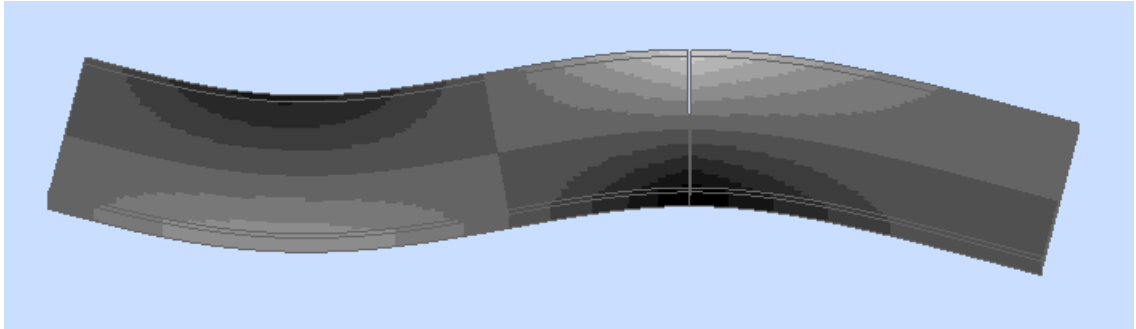
3 Poikkileikkausluokka ja sen merkitys

Teräsprofiilin poikkileikkausluokan määrittäminen on tärkeää suorittaa ennen varsinaisen mitoituksen aloittamista. Teoriassa poikkileikkausluokka kertoo poikkileikkauksen taso-osan alttiudesta stabiiliteetinmenetyksille kuten lommahdus. Erityisesti lommahdus on ohuutumisessa WQ-palkissa ilmiö, joka heikentää joissakin tapauksissa leikkauskestävyyttä merkittävästi ja pienentää taivutuskestävyyttä. [2.]

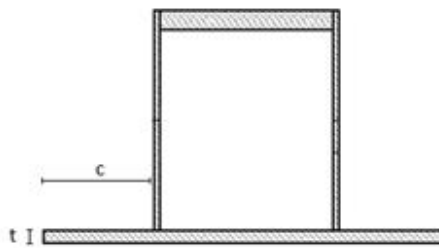
Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)			
I	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$

Kuva 5. Poikkileikkausluokan 1 rajahoikkeudet eri kuormitustilanteissa [3.]

Kuten eurokoodin mukaisen poikkileikkausluokituksen perusteella voidaan todeta, nimetään puristetuilla rakenneosilla rajahoikkeuden arvo on kaikkein pienin. Tämä asettaa ulokepalkin mitoituksen osalta leveän alalaipan puristetun osan hoikkeuden merkittävään asemaan ulokepalkin mitoituksessa (kuva 6). Alalaipan hoikkeutta ei voida suoraan eurokoodin ohjeiden mukaan laskea, sillä ohjetta WQ-palkin kaltaiselle profiilille ei eurokoodista löydy. Teräsrakenneyhdistyksen teräsnormikortin mukaan WQ-palkin alalaipan poikkileikkausluokan määrittämiseksi tarvitaan alalaipan uloimman reunan etäisyys uumasta mitattuna (kuva 7).



Kuva 6. Alalaippa on vedetty kentässä, mutta ulokkeella puristettu



Kuva 7. hoikkisuuden c/t laskemiseen tarvittavat parametrit

Tämän laskentaperiaatteen toteuttaminen kuitenkin edellyttää, että uuma on riittävän jäykkä tukemaan alalaippaa lommahtamiselta. Tämän tarkastamiseksi teräsnormikorttiin on kirjoitettu erillinen rajahoikkisuuden ehto uumalle (kaava 1). Tämä ehto ei esiinny poikkileikkausluokan laskemisessa ohjeistavassa osiossa teräsnormikorttia, mutta tämän ehdon täytyminen on edellytys poikkileikkausluokan pätemiselle. [1.]

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (1)$$

missä:

A_w = uuman pinta-ala

A_{fc} = kriittisemmän laipan pinta-ala

f_{yf} = kriittisemmän laipan myötöraja

$k = 0,3$, kun plastista kiertymistä hyödynnetään, $0,4$, kun plastisuusteorian mukaista taivutuskestävyyttä hyödynnetään tai $0,55$, kun kimmoteorian mukaista taivutuskestävyyttä hyödynnetään. [4, kohta 8(1).]

3.1 Johtopäätökset

Uuman osalta rajahoikkuus voidaan joko tarkistaa taivutettuna rakenteena tai taivutettuna ja puristettuna rakenteena. Käsien laskentaa ajatellen, mikäli kuormitus sen sallii, pelkän taivutetun rakenteen rajahoikkuudet on huomattavasti yksinkertaisempaa tarkistaa puristetun ja taivutetun rakenteen rajahoikkuuteen verrattuna. Tämä kuitenkin edellyttää tasapainotetun poikkileikkauksen käyttöä. Tarkastelemalla taivutetun ja puristetun rakenteen rajahoikkuuden kaavoja (kuva 5) huomataan, että plastisuusteorian mukaisen jännitysjakautuman perusteella puristetun osan korkeus on tarkalleen puolet koko uuman korkeudesta, kun:

$$t_{f1} = \frac{t_{f2} * b_{f2}}{b_{f1} + 2t_w}$$

ja kaikkien levyosien myötöraja on sama. α :n arvolla $0,5$ saadaankin rajahoikkuudeksi juuri 72ε , mikä on pelkän taivutusrasitukselle alttiin uuman rajahoikkuus poikkileikkausluokkaan 1. Esimerkki tilanteesta on esitetty liitteessä 1. Tarkastelu osoittaa, että eurokoodin kaavat taivutetun rakenteen rajahoikkuuksille on kirjoitettu symmetrisiä poikkileikkauksia ajatellen, jolloin WQ-palkkia mitoittaessa joudutaan kaavoja tulkitsemaan yksityiskohtaisemmin.

Tulkinnan perusteella, laskentapohjaa ajatellen, onkin suotuisempaa kirjoittaa poikkileikkausluokan tarkistamiseksi vain puristetun ja taivutetun rakenteen rajahoikkuudet (kuva 5, oikeanpuoleisin sarake). Mikäli kuormitustilanne on sellainen, että aksiaalisia kuormia ei esiinny ja poikkileikkaus on tasapainoinen, muodostuu rajahoikkuudeksi käytännössä sama hoikkuus, mikä saataisiin pelkän taivutetun rakenteen mukaisella tarkastelulla.

3.2 Efektiivinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4

Ulokepalkin tapauksessa on mahdollista, että koko poikkileikkaus määritellään alalaipan puristetun osan perusteella poikkileikkausluokkaan 4. Tämä tilanne tulee vastaan usein silloin, kun esimerkiksi tukipisteen peruspulttien sijainti asettuu palkkiin nähden siten, että joko ylälaippa tai alalaippa reiätetään peruspultteja varten. Mikäli WQ-palkin leveys on sellainen, että peruspulttien mahdollinen ylälaippaan ei ole mahdollista, joudutaan tilanteeseen, jossa alalaipan pituus uuman reunasta mitattuna kasvaa suhteellisen suureksi. Kuten alalaipan hoikkuuden määritelmästä voidaan huomata, mitä suurempi tämä etäisyys on, sitä hoikemmasta taso-osasta on kyse.

Edellä kuvattua tilannetta tulee välttää viimeiseen asti, mutta mikäli palkin kuormitus on vaatimaton, eikä palkin jänneväli ole erityisen suuri, voidaan ajatella palkin mitoittamista poikkileikkausluokassa 4. Tämä edellyttää palkin laipan sekä uuman tehottomien osien laskentaa. Lisäksi tulee muistaa, että teräsrakenneyhdistyksen asettamat teräsnormikortin ohjeet eivät ole voimassa poikkileikkausluokassa 4. [1.]

Tehollisen alueen laskenta on iteratiivinen laskutoimenpide. Laskentaperiaate ei eroa käytännössä laisinkaan ohutuumapalkin uuman tehollisen alueen laskennasta. WQ-palkin tapauksessa voidaan ajatella, että kyseessä on kahdelta reunalta tuettu taso-osa. Jotta voidaan määritellä tehollisen alueen leveys, täytyy ensin määritellä seuraavat parametrit:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 * E}{12(1-\nu^2)} * \left(\frac{t_f}{b_f}\right)^2 \quad (2)$$

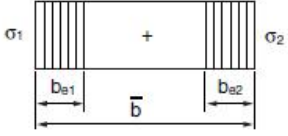
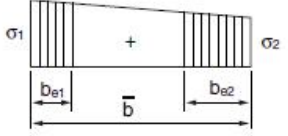
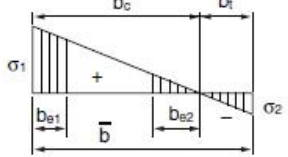
$$\sigma_{cr} = k_\sigma * \sigma_E \quad (3)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (4)$$

$$\rho = 1, \text{ kun } \lambda_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(3+\psi)}{\lambda_p^2} \leq 1,0, \text{ kun } \lambda_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (6)$$

Taulukko 2.10 Kahdelta reunalta tuettujen puristettujen taso-osien tehollinen leveys [12,13]

Jännitys jakauma (puristus positiivinen)			Tehollinen leveys b_{eff}			
			$\psi = 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$			
			$0 \leq \psi < 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 2 b_{eff} / (5 - \psi)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
			$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	$-3 \leq \psi < -1$ a)	-1	$-1 < \psi < 0$	0	$0 < \psi < 1$	1
Lommuhduskertoimen k_σ	$5,98(1 - \psi)^2$	23,9	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	7,81	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	4,0
a) Lauseke on korjattu lähteen [13] mukaisesti.						
Mitta $\bar{b} = b$ taulukon 2.7 mukaisesti (kahdelta reunalta tuetut taso-osat).						

Kuva 8. Efektiivinen osa alalaipasta [4.]

Edellä määritetyistä parametreista kriittisen lommahdusjännityksen σ_{cr} laskemiseksi tarvitaan jännityksien suhteesta johdettava lommahduskertoimen k_σ . Lommuhduskertoimen arvo määritellään jännitys jakauman perusteella kuvassa 6 esitetyn taulukon esittämällä tavalla. Tapauksessa käsitellään puristettua alalaippaa, joten jännitys on kauttaaltaan puristusta. Puristus jakautuu tasaisesti, jolloin taulukon esittämät reunajännitykset σ_1 ja σ_2 ovat samansuuruiset. Näin ollen lasketaan tarvittava pienennystekijä ρ . Kertomalla pienennystekijällä alalaipan leveys saadaan jäljelle jäänyt tehollinen leveys.

Käyttämällä jäykkyyttä määritettäessä uusia pienennettyjä efektiivisiä mittoja poikkileikkaukselle saadaan poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti I_{eff} (vertaa kaava 13).

Tehollisen jäyhyysmomentin avulla voidaan määrittää poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus seuraavasti:

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{\max(z_{el}, h_u - z_{el})} \quad (7)$$

4 MRT-mitoitus poikkileikkausluokassa 1–3

4.1 Alalaipan poikittainen taivutus

Kuten aikaisemmin todettiin, kuormitukset WQ-palkille kertyvät usein ontelolaatastolta. Epäkeskisyytensä tähden kuormitus aiheuttaa alalaipalle poikittaista vääntöä. Näin ollen mitoittajan tulee tarkistaa, kestäkö alalaippa poikittaisen taivutuksen ja onko poikittaisella taivutuksella vaikutusta kestävyteen y-akselin (kuva 2) suhteen tapahtuvan taivutuksen osalta. Tämän tarkistamiseksi tarvitaan alalaipan taivutusvastus, mikä voidaan laskea poikkileikkausluokasta riippuen seuraavasti:

$$W_{p.pl} = 1000mm \frac{t_{f2}^2}{4} \frac{1}{m}, PLL1 \text{ ja } PLL2 \quad (8)$$

$$W_{p.el} = 1000mm \frac{t_{f2}^2}{6} \frac{1}{m}, PLL3 \quad (9)$$

Huomioitavaa on, että taivutusvastuksien yksikkö on tässä tapauksessa $\frac{mm^3}{m}$ ja alalaippaa poikittain taivuttavan kuormituksen ja tästä syntyvän taivutusmomentin yksikkö on $\frac{Nmm}{m}$. Yksikkömuunnokset ovat kaikissa tapauksissa sallittuja, mutta niiden suhteen on noudatettava ehdotonta tarkkuutta. Poikkileikkausluokan mukaan lasketaan tarvittava taivutusvastuksen arvo ja lasketaan alalaipan taivutuskestävyys seuraavasti:

$$M_{p.Rd} = \frac{W_{p.xx} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (10)$$

Mikäli poikittaisen taivutuksen käyttöaste täyttää seuraavan ehdon, ei se edellytä muita tarkasteluja:

$$\frac{|M_{p.Ed}|}{M_{p.Rd}} \leq 0,5 \quad (11)$$

Mitoittavan poikittaisen taivutuksen laskemiseksi tarvittava epäkeskisyys voidaan laskea kaavasta:

$$b_j + \frac{d}{2}$$

missä:

b_j on saumavalun paksuus

d on tukipinnan leveys

Epäkeskisyyden kaava on voimassa ontelolaattojen tapauksessa.

Kaava 11 siis tarkoittaa sitä, että mikäli alalaipan poikittaisen taivutuksen kestävyys on yli puolet alalaipan poikittaiseen kuormitukseen nähden, voidaan olettaa poikittaisen taivutuksen vaikutukset y-akselin (kuva 2) suuntaiseen taivutukseen pieniksi. Mikäli näin ei kuitenkaan ole, eikä kaavan 11 mukainen ehto täyty, pienennetään y-akselin suuntaista taivutuskestävyyttä pienentämällä teräksen lujuutta seuraavan kaavan mukaisesti:

$$f_{y.pienennetty} = f_y \sqrt{1 - \left(\frac{M_{p.Ed}}{M_{p.pl.Rd}} \right)^2} \quad (12)$$

Kun pienennetty myötöraja jaetaan täydellä myötörajalla f_y , saadaan poikittaisen taivutuksen aiheuttama pienennystekijä ρ_1 :

$$\rho_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{M_{p.Ed}}{M_{p.pl.Rd}} \right)^2}$$

4.2 Taivutuskestävyys taivutukselle y-akselin suhteen

Taivutuskestävyyden laskemiseksi y-akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle tarvitaan poikkileikkauksen taivutusvastus W_{wq} . Taivutusvastuksen laskentaperiaate määräytyy poikkileikkauksen mukaan; käytetäänkö plastisuusteorian mukaisia arvoja vai

kimmoteorian mukaisia arvoja. Taivutusvastus voitaisiin laskea suoraan poikkileikkauksesta pintaintegraalina, mutta taivutusvastuksen laskenta jäyhyysmomenttia hyödyntäen on suositeltavaa. Tämä siis siksi, että jäyhyysmomenttia tarvitaan myöhemmin muun muassa taipuman laskennassa. Jäyhyysmomentin laskemiseksi hyödynnetään Steinerin sääntöä, josta jäyhyysmomentiksi saadaan:

$$I_{y.wq.el} = \sum [I_{oi} + A_i r_i^2.]$$

$$I_{y.wq.el} = \frac{b_{f2} t_{f2}^3}{12} + b_{f2} t_{f2} \left(z_{el} - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 + 2 \left[\frac{t_w h_u^3}{12} + t_w h_u \left(t_{f2} + \frac{h_u}{2} - z_{el} \right)^2 \right] + \frac{b_{f1} t_{f1}^3}{12} + b_{f1} t_{f1} \left(h - \frac{t_{f1}}{2} - z_{el} \right)^2 \quad (13)$$

Samaa ajatusta noudattaen saadaan myös poikkileikkausluokassa 4 mitoitettavan palkin jäyhyys. Kaavaan tulee tällöin vain sijoittaa palkin teholliset mitat. Taivutusvastus saadaan laskettua jakamalla jäyhyysmomentti suuremmalla neutraaliakselin reunaetäisyydellä:

$$W_{wq.el} = \frac{I_{y.wq.el}}{\max(z_{el}, h_u - z_{el})} \quad (14)$$

Plastisuusteorian mukaista taivutusvastusta laskettaessa voidaan hyödyntää plastisen tilan neutraaliakselin korkeutta sekä plastisen tilan jännitysjakamaa. Liitteessä 2 käsitellään yksinkertainen tapaus taivutusvastuksen laskennasta ja sovellus WQ-palkilla. [2.]

$$W_{wq.pl} = \sum [A_i r_i.]$$

missä:

r_i = levyosan puristetun/vedetyn osan painopisteen etäisyys plastisesta neutraaliakselista

Näin ollen saadaan:

$$W_{wq.pl} = b_{f2}t_{f2}\left(z_0 - \frac{t_{f2}}{2}\right) + 2\left[t_w(z_0 - t_{f2})\left(z_0 - t_{f2} - \frac{z_0 - t_{f2}}{2}\right)\right] + 2\left[t_w(h - z_0)\left(\frac{h - z_0}{2}\right)\right] + b_{f1}t_{f1}\left(h - z_0 - \frac{t_{f1}}{2}\right) \quad (15)$$

Taivutuskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$M_{el.Rd} = \frac{W_{wq.el} * f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ kun poikittainen taivutus ei pienennä taivutuskestävyyttä} \quad (16)$$

$$M_{el.Rd} = \frac{W_{wq.el} * f_{y.pien}}{\gamma_{M0}}, \text{ kun poikittainen taivutus pienentää taivutuskestävyyttä} \quad (17)$$

Plastisuusteorian mukaiset arvot taivutuskestävyydelle poikkileikkausluokissa 1 ja 2 lasketaan saman periaatteen mukaisesti [2].

4.3 Plastinen leikkauskestävyys

Leikkausvoimakestävyyden tarkistamiseksi tarvitaan leikkaukselle tehollinen pinta-ala A_v :

$$A_v = \eta * 2h_w * t_w \quad (18)$$

$$V_{pl.Rd} = \frac{A_v * f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (19)$$

missä:

$$\eta = 1.2, \text{ kun } f_y = S235 - S460$$

$$\eta = 1.0, \text{ kun } f_y > S460$$

Kaavassa esiintyvä $\sqrt{3}$ voidaan selittää kaksiulotteisen jännitystapauksen ja pääjännityksien yhdistelyn kaavalla (von Mises). Poikkileikkauksessa, jossa esiintyy vain leikkausjännitys, voidaan havaita, että x- ja y-akselin suuntaista jännitystä ei esiinny ja, että $\tau_{xy} = \tau$. Kun koordinaatistoa käännetään sopivasti siten, että se on yhtenevä pää-

jännityksien suunnissa, leikkausjännitykset häviävät. Tässä jännitystilassa pääjännitykset ovat $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$. Sijoittamalla nämä arvot von Misesin yhtälöön saadaan:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2 - \sigma * (-\sigma)} = \sqrt{3\sigma^2} = \sqrt{3\tau_{max}^2}$$

$$\tau_{max} = \sigma = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

missä:

σ_y kuvaa myötörajan suuruutta

Tästä siis huomataan, että poikkileikkaus kestää puhdasta leikkausjännitystä vain noin puolet verrattuna suurimpaan myötörajan arvoon [5].

Aihetta käsitellään tarkemmin käyttörajan jännityksiä käsittelevässä luvussa 5.1.

Leikkauskestävyyden lisäksi tulee tarkistaa, täytyykö leikkauslommahtaminen ottaa huomioon. Tämän tarkastamiseksi eurokoodista löytyy erillinen rajahoikkuus. Käytännössä normaalilujuisella teräslaadulla ehtona on, että uuman ”käyttöaste” poikkileikkausluokkaan 1 on korkeintaan 80 prosenttia. Lausuttuna ehtona tämä kaava on muotoa:

$$\frac{h_w}{t_w} < \frac{72\varepsilon}{\eta} \tag{20}$$

missä:

$$\eta = 1.2, \text{ kun } f_y = S235 - S460$$

$$\eta = 1.0, \text{ kun } f_y > S460$$

Huomionarvoista kyseisen ehdon tarkistamisessa on se, että useassa lähteessä, muun muassa eurokoodissa, ehto on kirjoitettu niin sanotusti toisinpäin. Eurokoodin mukaan leikkauslommahdus täytyy huomioida, mikäli uuman hoikkuus on suurempi kuin rajahoikkuus. Toisin sanoen tarkistusta ei tarvitse tehdä, mikäli ehto ei päde. Tämä on aiheuttanut paljon väärinymmärryksiä monessa tilanteessa, joten tähän yhteyteen ehto

on kirjoitettu esimerkiksi poikkileikkausluokan ehtojen kanssa konsistenttiin muotoon. Toisin sanoen, mikäli kaavan 20 mukainen ehto täyttyy, ei tarvitse leikkauslommahtamista ottaa huomioon. [1.]

4.4 Vääntö ja väännön aiheuttama lisäleikkausvoima

Teräsrakenneyhdistyksen teräsnormikortti antaa ohjeet vääntökestävyyden laskemiseksi. Huomionarvoista näissä ohjeissa on se, että laskutapa olettaa ainoastaan WQ-palkin kotelo-osan vääntöjäyhäksi. Lisäksi paksuudeltaan eroavaisten levyosien takia joudutaan tekemään varmallalla puolella oleva oletus, jonka mukaan kaikki levyosat ovat ohuimman levyosan paksuisia. Tämän perusteella vääntökestävyys lasketaan seuraavien kaavojen mukaisesti, mikäli leikkauslommahdus ei ole määräävä:

$$A_{\text{vääntö}} = (b_{f1} - t_w) \left(h_w \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right) \quad (21)$$

$$T_{Rd} = \frac{2A_{\text{vääntö}} \cdot t_{\text{vääntö}} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (22)$$

missä:

$$t_{\text{vääntö}} = \min(t_{f1}, t_{f2}, t_w) \quad (23)$$

Laskentaperiaatetta puoltaa tulos, joka saadaan, kun lasketaan kotelo-osan sekä laipan osille vääntöjäyhydet. Huomataan, että kotelon vääntöjäyhyys on yli tuhatkertainen laipan osiin verrattuna (kuva 9).

$I_{v1} := \frac{4 \cdot \left[(b - t_w) \cdot \left(h - \frac{t_{f1}}{2} - \frac{t_{f2}}{2} \right) \right]^2}{\frac{2 \cdot (b - t_w) + 2 \cdot \left(h - \frac{t_{f1}}{2} - \frac{t_{f2}}{2} \right)}{t_w}} = 3.053 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$	$I_{v2} := 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot b_1 \cdot t_{f2}^3 = 1.693 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$
KOTELON VÄÄNTÖJÄYHYYS	SUORAKAITEEN VÄÄNTÖJÄYHYYS

Kuva 9. Kotelon ja suorakaiteen muotoisten laipanosien vääntöjäyhydet erällä palkilla [6.]

Koska vääntö jakautuu palkin osille niiden vääntöjäyhyksien suhteessa, olisi periaatteessa perusteltua vähentää vääntörasituksesta laipanosien osuus. Saavutettu hyöty on kuitenkin hyvin pieni.

Suhteuttaessa yleisimpien käytössä olevien WQ-palkkien vääntökapasiteetit tavanomaisiin kuormitustilanteisiin huomataan, että väännön osuus palkin mitoituksessa ei ole merkittävä. On kuitenkin huomioitava, että väännöllä on muitakin vaikutuksia palkin kestävytyteen. Näistä merkittävämpinä voidaan pitää väännön aiheuttamaa lisäleikkausvoimaa sekä väännön vaikutusta käyttörajatilan normaalijännityksiin.

Vapaa vääntö aiheuttaa palkille leikkausjännityksen, jonka suuruus lasketaan seuraavien kaavojen mukaisesti:

$$\tau_{t.Ed} = \frac{T_{Ed}}{2A_{vääntö} * t_{vääntö}} \quad (24)$$

missä:

T_{Ed} = vapaan väännön mitoitusarvo

Leikkausvoimasta aiheutuva jännitys voidaan laskea leikkausjännityksen kaavalla seuraavasti:

$$\tau_V = \frac{Q * S}{I * b}$$

Mistä saadaan:

$$Q = \Delta V_{Ed} = \frac{\tau_{t.Ed} * I_{y.wq.el} * t_w}{S_{wq}} \quad (25)$$

missä:

$$S_{wq} = (b_{f2} * t_{f2} + z_{el} * 2t_w) * \left(\frac{z_{el}}{2}\right) \quad (26)$$

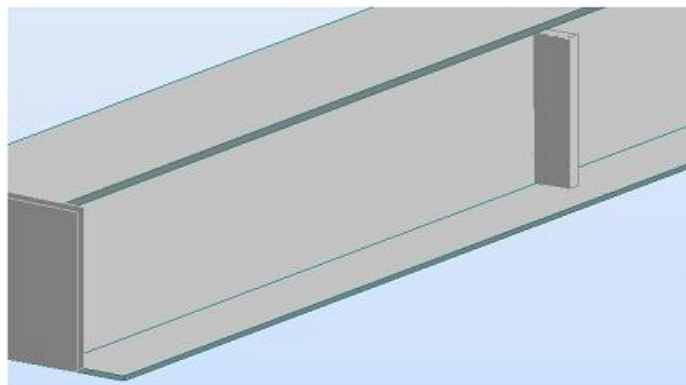
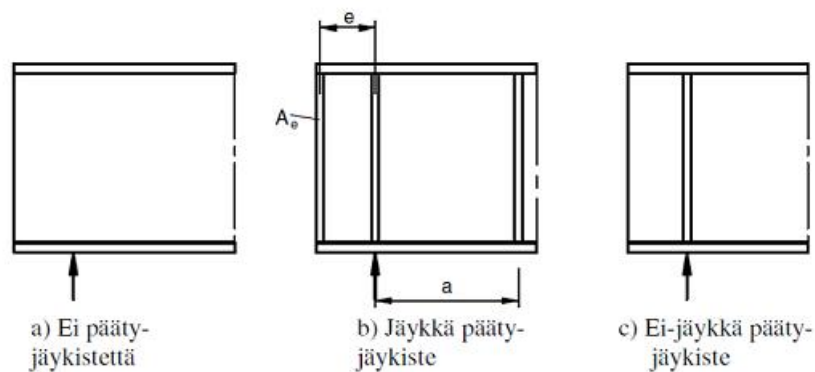
S_{wq} on poikkileikkauksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteessä

Vääntöä ajatellen leikkausjännityksen kaavassa tekijä b on yhden uuman leveys.

4.5 Leikkauslommahtaminen

Kun WQ-palkin mitoittamisessa on päästy pisteeseen, missä väännön aiheuttama lisäleikkausvoima on lisätty vaikuttavaan leikkausvoimaan, voidaan mitoittaa palkki niille ilmiöille, joiden kapasiteettia leikkausvoiman vaikutus mahdollisesti pienentää.

Leikkauslommahduksen mitoitus aloitetaan määrittelemällä uuman jäykisteiden välinen etäisyys. Useassa tapauksessa uuma on koko ulokkeen matkalta jäykistämätön, jolloin jäykisteiden välinen etäisyys on koko ulokkeen pituus. Tämä siis siksi, että palkin päässä on aina jäykkä päätylevy. Mikäli uuma on syystä tai toisesta jäykistetty ulokkeen pituudella, valitaan jäykisteiden välisistä etäisyyksistä suurin (kuva 10).



Kuva 10. Eurokoodin mukainen määrittely jäykisteelle (a, b, c)

Leikkauslommahduksen vaikutuksen laskemiseksi tarvitaan seuraavat tekijät:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 * E_S * t_w^2}{12(1-\nu^2)h_w^2} \quad (27)$$

missä:

ν = teräksen suppeumaluku = 0,3

$$k_\tau = 5,34 + 4 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2, \text{ kun } \frac{a}{h_w} \geq 1 \quad (28)$$

$$k_\tau = 4 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2, \text{ kun } \frac{a}{h_w} < 1 \quad (29)$$

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \quad (30)$$

$$\lambda_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr}}} \quad (31)$$

$$\chi_w = \eta, \text{ kun } \lambda_w < \frac{0,83}{\eta} \quad (32)$$

$$\chi_w = \frac{0,83}{\eta}, \text{ kun } \lambda_w \geq \frac{0,83}{\eta} \quad (33)$$

missä:

$\eta = 1,2$, kun $f_y = S235 - S460$

$\eta = 1,0$, kun $f_y > S460$

$$V_{bw.Rd} = \frac{\chi_w * f_y * h_w * t_w}{\gamma_{M1} * \sqrt{3}} \quad (34)$$

$$c_1 = a \left(\frac{1}{4} + \frac{1.6 * b_{fxx} * t_{fxx}^2 * f_{yf}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) \quad (35)$$

$$M_{f.Rd} = \frac{W_{wq.laipat} * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (36)$$

missä:

$$W_{wq.laipat} = \frac{I_{wq.laipat}}{\max(z_{el}, h_{wq} - z_{el})}$$

$$I_{wq.laipat} = \frac{b_{f2} t_{f2}^3}{12} + b_{f2} t_{f2} \left(z_{el} - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 + \frac{b_{f1} t_{f1}^3}{12} + b_{f1} t_{f1} \left(h_{wq} - z_{el} - \frac{t_{f1}}{2} \right)^2$$

$$V_{bf.Rd} = \frac{b_{fxx} * t_{fxx}^2 * f_y}{c_1 \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{y.Ed}}{M_{f.Rd}} \right)^2 \right) \quad (37)$$

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} + V_{bf.Rd}, \text{ kun } |M_{y.Ed}| < M_{f.Rd} \quad (38)$$

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd}, \text{ kun } |M_{y.Ed}| > M_{f.Rd} \quad (39)$$

Leikkauskapasiteetti riittää, mikäli seuraava ehto toteutuu:

$$\frac{|V_{Ed}|}{V_{b.Rd}}, \text{ kun } \frac{h_w}{t_w} > \frac{72\varepsilon}{\eta}$$

$$\frac{|V_{Ed}|}{V_{pl.Rd}}, \text{ kun } \frac{h_w}{t_w} < \frac{72\varepsilon}{\eta}$$

Laskuissa $c_1:n$ ja $V_{bf.Rd}:n$ laskennassa b_{fxx} ja t_{fxx} korvataan sen laipan alaindeksillä, kummalla laipoista on pienempi taivutuskestävyys. Kaavoista huomataan, että leikkaukseen osallistuu ainoastaan uumat, mikäli taivutuksen osalta laippojen kaikki kapasiteetti on käytetty. Jos Laippojen taivutuskestävyys ei ylitä, voidaan olettaa myös laippojen toimivan tehollisena leikkauslommahdusta vastustamassa. [3.]

Tarkastelemalla kaavoja tarkemmin ja vertaamalla niitä tehollisen poikkileikkauksen määrittämisessä käytettäviin kaavoihin poikkileikkausluokassa 4, huomataan yhtäläisyys kriittisen lommahdus jännityksen osalta. Yhtäläisyyksistä voidaan päätellä, että poikkileikkausluokassa 4 laskettavan tehollisen poikkileikkauksen periaate perustuu

siihen, että laippa lommahtaa paikallisesti. Lommahtamisen seurauksena poikkileikkauksesta suljetaan pois tehottomana alue, joka katsotaan lommahtaneen. Kuten kaavasta 5 voidaan huomata, mikäli jännitys ei ylitä lommahtamiselle kriittistä raja-arvoa, ei poikkileikkausta tarvitse pienentää.

4.6 Palkkia rasittavien voimasuureiden yhteisvaikutus taivutuskestävyyteen

Tässä luvussa käsitellään palkin staattisen kuormienkantokyvyn laskemista tilanteessa, jossa kuormituksen vaikutukset voivat vaikuttaa ristiin eri kestävyyskeinoihin. Yksi tärkeimmistä kestävyyskeinoista onkin taivutuskestävyyden arvo, mikä onkin usein määräävä.

4.6.1 Taivutuskestävyys ilman leikkauslommahduksen vaikutusta

Taivutuskestävyyden lopulliseksi toteamiseksi täytyy ottaa huomioon joukko muiden rasitusten vaikutuksia. Leikkausvoima, poikittainen taivutus sekä vääntö voivat kaikki pienentää taivutuskestävyyttä.

Leikkausvoima pienentää taivutuskestävyyttä, mikäli leikkausvoima ylittää puolet plastisesta taivutuskestävyydestä. Eurokoodiin tämä ehto on kirjoitettu muotoon:

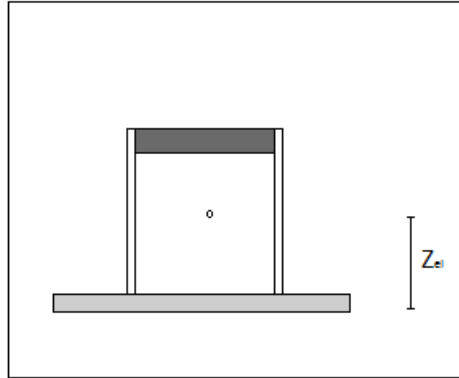
$$V_{Ed} > 0,5 * V_{pl,Rd}$$

Mikäli palkkia kuormittava leikkausvoima on suurempi kuin puolet palkin plastisesta leikkauskestävyydestä, joudutaan taivutuskestävyyttä pienentämään. Pienennys tapahtuu pienentämällä myötörajaa f_y . Myötörajaa pienennetään pienennyskerroimella, joka lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$\rho_2 = \left(\frac{2|V_{Ed}|}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (40)$$

Pienennyskerroin ρ_2 pienentää uumien taivutuskestävyyttä pienentämällä uumien myötörajaa. Lisäksi on huomioitava, että alalaipan poikittainen taivutus pienentää alalaipan taivutuskestävyyttä, mikäli poikittaisen taivutuksen mitoitusarvo on suurempi kuin puolet alalaipan plastisesta taivutuskestävyydestä. On siis mahdollista, että leikkausvoima

pienentää WQ-palkin taivutuskestävyyttä uumien osalta, sekä poikittainen taivutus alalaipan osalta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa poikkileikkauksen eri osien taivutuskestävyys lasketaan erikseen. Mikäli näin on, poikkileikkaus voidaan jakaa seuraavan kuvan mukaisiin komponentteihin (kuva 12):



Kuva 11. WQ- palkin jakautuminen taivutuskestävyyden tarkastamiseksi

Kuvassa 11 vaaleanharmaalla merkityn alalaipan taivutuskestävyyttä pienennetään pienennystekijällä ρ_1 , mikä määräytyy poikittaisen taivutuksen käyttöasteen mukaan ja on määritelty aikaisemmin kappaleessa 4.1. Kuvassa 11 valkoisella merkittyjen uumien taivutuskestävyyttä pienennetään pienennystekijällä ρ_2 , mikä määräytyy leikkausvoiman käyttöasteen mukaan ja on määritelty aikaisemmin tässä kappaleessa. Lopullisen taivutuskestävyyden laskemiseksi tarvitaan WQ-palkin osien erilliset taivutusvastukset, jotka voidaan määritellä seuraavasti:

Alalaippa:

$$W_{alalaippa} = \frac{I_{alalaippa}}{\max(z_{el}, h_{wq} - z_{el})} \quad (41)$$

missä:

$$I_{alalaippa} = \frac{b_{f2} t_{f2}^3}{12} + b_{f2} * t_{f2} \left(z_{el} - \frac{t_{f2}}{2} \right)^2 \quad (42)$$

Uumat:

$$W_{uumat} = \frac{t_w h_w^2}{6} * 2 \quad (43)$$

Ylälaippa:

$$W_{ylälaippa} = \frac{I_{ylälaippa}}{\max(z_{el}, h_{wq} - z_{el})} \quad (44)$$

missä:

$$I_{ylälaippa} = \frac{b_{f1} t_{f1}^3}{12} + b_{f1} * t_{f1} \left(h_{wq} - z_{el} - \frac{t_{f1}}{2} \right)^2 \quad (45)$$

Kun WQ-palkin osien taivutusvastukset on selvitetty, voidaan laskea palkin lopullinen taivutuskestävyys seuraavan kaavan mukaisesti:

$$M_{wq.Rd} = \rho_1 * f_y * W_{alalaippa} + (1 - \rho_2) * f_y * W_{uumat} + f_y * W_{ylälaippa} \quad (46)$$

missä ρ_1 on alalaipan myötörajan pienennystekijä poikittaisesta taivutuksesta ja ρ_2 uumien myötörajan pienennystekijä leikkausvoiman vaikutuksesta.

Käytettäessä kaavaa 46 taivutuskestävyyden tarkistamiseksi silloin, kun leikkauslomahdus ei heikennä poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä, tulee noudattaa erityistä tarkkuutta pienennyskertoimien määrittämisessä. Pienennyskertoimet voidaan määrittää seuraavien ehtojen mukaisesti:

$$\rho_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{M_{p.Ed}}{M_{p.pl.Rd}} \right)^2} \quad \text{kun } \frac{|M_{p.Ed}|}{M_{p.Rd}} > 0,5, \text{ muutoin } 1$$

$$\rho_2 = \left(\frac{2|V_{Ed}|}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 \quad \text{kun } V_{Ed} > 0,5 * V_{pl.Rd}, \text{ muutoin } 0$$

Pienennystekijöiden määrittely edellä kuvatulla tavalla mahdollistaa kaavan käyttämisen myös silloin, kun poikittainen taivutus tai leikkausvoima ei pienennä taivutuskestävyyttä; tällöin myötöraja huomioidaan alalaipan sekä uumien osalta täytenä.

4.6.2 Taivutuskestävyys ja leikkauslommahduksen vaikutus

Teräsrakenneyhdistyksen teräsnormikortissa määritellään mitoitusperiaate tapaukselle, jossa uumien leikkauskestävyys on pienempi kuin puolet vallitsevaan leikkausrasitukseen nähden. Ehto voidaan esittää kaavana seuraavassa muodossa:

$$\eta_3 = \frac{|V_{Ed}|}{V_{bw,Rd}} > 0,5$$

missä:

$V_{bw,Rd}$ on uumien leikkauskestävyys, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskapasiteettia.

Toisin sanoen mikäli leikkauslommahdus pienentää leikkauskapasiteettia, ja jäljelle jäänyt kestävyys on alle puolet mitoittavasta leikkausvoimasta, tulee tarkistaa seuraava ehto taivutuskestävyydelle:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,pl,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2 * \eta_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad (47)$$

missä:

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$M_{f,pl,Rd}$ on palkin plastinen taivutuskestävyys, kun uumien osuutta ei oteta huomioon

4.6.3 Johtopäätökset

Tulkitsemalla leikkauslommahduksen tarkastelun kaavaa 32 huomataan, että mikäli kriittiset rajat pitkien levyjen lommahtamiselle eivät ylitä, saa uumien leikkauslommahdus kestävyys kaavan 19 mukaisen, plastisen leikkauskestävyyden arvon. Tarkastelemalla leikkauslommahduksen kaavoja tarkemmin huomataan, että uuman jäykisteiden välisellä etäisyydellä ei ole suurta merkitystä uuman kriittiseen lommahdusjännitykseen, mikäli lommahdustukien välinen etäisyys on suurempi kuin $\sim 3h_w$. Huomioitakoon lisäksi se, että mitä hoikempi uuma on, sitä pienempi sen kriittinen lommahdusjännitys

lähtökohtaisesti on. Erittäin korkean ja ohuen uuman tapauksessa tulee kyseeseen huomattavasti tiheämpi lommahdustukien väli kuin $\sim 3h_w$, sillä kriittinen lommahdusjännitys on huomattavan alhainen. Edellä mainitut seikat käyvät ilmi kaavasta 28, sillä uuman korkeuden ja lommahdustukien välisen etäisyyden osamäärän neliö on käytännössä häviävän pieni, mikäli lommahdustukien välinen etäisyys on yli kolminkertainen uuman korkeuteen verrattuna.

Lisäksi voidaan havaita, että poikkileikkauksen plastista leikkauskestävyyttä on joissakin harvinaisissa tapauksissa mahdollista kasvattaa leikkauslommahduksen ehtojen perusteella. Näin on, mikäli kaavan 20 mukainen ehto edellyttää leikkauslommahduksen huomioon ottamisen, mutta kaavan 32 perusteella saadaan uumien leikkauslommahdus kestävyudeksi kaavan 19 mukainen poikkileikkauksen plastinen leikkauskestävyys, tai kestävyyttä pienennetään vain vähän. Mikäli tämän lisäksi laippojen taivutuskapasiteettia ei hyödynnetä täysin, voidaan laippojen osuus leikkauskestävyyteen ottaa huomioon. Tämä kuitenkin edellyttää uuman jäykistämistä verrattain tiheällä jaolla, mikä useassa tapauksessa ei muun muassa taloudellisista syistä ole suotavaa. Lisäksi laippojen leikkauskestävyyttä parantava vaikutus on vain murto-osa uumien leikkauskestävyydestä, ellei taivutusmomentti ole hyvin pieni ja jäykisteiden välinen etäisyys tiheä. Näin ollen saavutettu hyöty jää lähestulkoon aina hyvin pieneksi. Kaikesta huolimatta leikkauslommahduskestävyyden yhteydessä esitetään vaatimus, ettei leikkauslommahduskestävyys saa olla kaavan 19 mukaista kestävyyttä suurempi. Kuva 12 esittää edellä kuvatun tapauksen laskennan.

Eriyisen huomionarvoista kaavassa 47 on kuitenkin se, mitä saadaan taivutuskestävyydeksi tapauksessa, jossa uumien leikkauskestävyys on vain hieman vähemmän kuin puolet vallitsevasta leikkausrasituksesta. Tilanteen havainnollistamiseksi sijoitetaan lausekkeeseen arvoja tapauksessa, jossa näin tapahtuu:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f.pLRd}}{M_{pLRd}}\right) (2 * 0,55 - 1)^2$$

Lausekkeen tummennettu osa antaa arvoksi 0,01. Taivutuskestävyyteen vaikuttaa myös laippojen osuus poikkileikkauksen plastisesta taivutuskestävyydestä, mutta olipa laippojen osuus oikeastaan mitä tahansa, kun tämä kerrotaan lausekkeen loppuosalla, jäljelle jäävä osa on merkityksettömän pieni. Näin ollen tapauksessa, jossa uumien leikkauslommahdus kestävyuden käyttöaste $0,5 < \eta_3 \leq 0,75$, määrittelee poikkileikka-

uksen taivutuskestävyyden käytännössä lausekkeen termi η_1 . Tilanteessa on otettu huomioon, että poikkileikkauksen plastisesta taivutuskestävyydestä suurin osa muodostuu laippojen taivutuskestävyydestä. Kuten aikaisemmin määriteltiin, η_1 on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden käyttöaste. Tämä tulee kyseeseen poikkileikkausluokissa 1 ja 2, mutta leikkauslommahdus tarkastelun vaatima uuma kuuluu korkeintaan poikkileikkausluokkaan 3.

$$E_s := 210000\text{MPa} \quad t_w := 6\text{mm} \quad h_u := 400\text{mm} \quad \nu := 0.3 \quad a := 0.4\text{m} \quad b_{f1} := 350\text{mm} \quad \epsilon := \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_y}} = 0.814$$

$$t_{f2} := 12\text{mm} \quad t_{f1} := 18\text{mm} \quad a_{\text{hitsi}} := 5\text{mm} \quad f_y := 355\text{MPa} \quad b_{f2} := 660\text{mm} \quad \frac{h_w}{t_w} = 60.833$$

$$h_w := h_u - t_{f1} - t_{f2} - a_{\text{hitsi}} \quad \eta := 1.2 \quad \gamma_{M1} := 1 \quad W_{wq,pl} := 3521\text{cm}^3 \quad \frac{h_w}{t_w} < \frac{72\epsilon}{\eta} = 0$$

$$M_{y,Ed} := 555\text{kN}\cdot\text{m} \quad b_1 := \frac{b_{f2} - b_{f1} - 2t_w}{2}$$

1.

$$\sigma_{1E} := \frac{\pi^2 E_s t_w^2}{12(1-\nu^2)h_u^2} = 43\text{MPa}$$

$$k_{\tau} := \begin{cases} 5.34 + 4 \left(\frac{h_u}{a}\right)^2 & \text{if } \frac{a}{h_w} \geq 1 = 9.34 \\ 4 + 5.34 \left(\frac{h_u}{a}\right)^2 & \text{if } \frac{a}{h_w} < 1 \end{cases}$$

$$\tau_{cr} := k_{\tau} \cdot \sigma_{1E} = 399\text{MPa}$$

$$\lambda_w := 0.76 \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr}}} = 0.717$$

$$\chi_w := \begin{cases} \eta & \text{if } \lambda_w < \frac{0.83}{\eta} = 1.158 \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{if } \frac{0.83}{\eta} \leq \lambda_w \end{cases}$$

$$V_{bw,Rd} := \frac{\chi_w f_y 2h_u t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 1139\text{kN}$$

2.

$$c_{c1} := a \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1.6 b_{f1} t_{f2}^2 f_y}{t_w h_u^2 f_y} \right) = 0.134\text{m}$$

$$M_{f,pl,Rd} := \frac{W_{wq,pl} f_y}{\gamma_{M1}} - \frac{f_y \left(\frac{b_{f2} h_u^2}{6} - \frac{b_1 h_u^2}{6} \cdot 2 - \frac{b_{f1} h_u^2}{6} \right)}{\gamma_{M1}} = 1136\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$V_{bf,Rd} := \frac{b_{f1} t_{f2}^2 f_y}{c_{c1} \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{f,pl,Rd}} \right)^2 \right] = 102\text{kN}$$

$$V_{b,Rd} := V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 1241\text{kN}$$

$$V_{pl,Rd} := \frac{\eta f_y 2h_u t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 1181\text{kN}$$

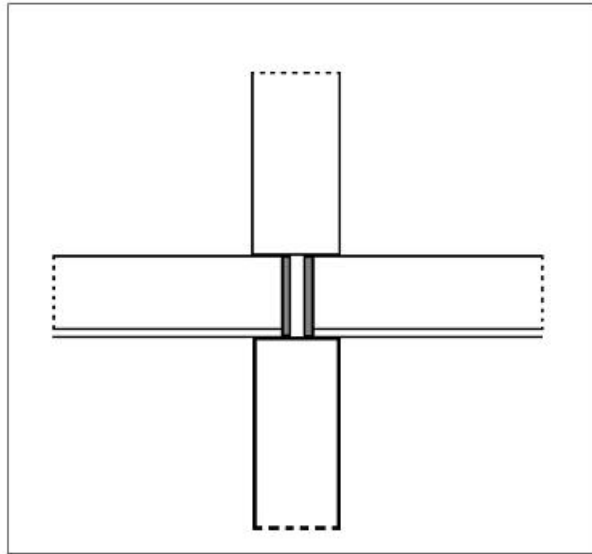
POIKKILEIKKAUKSEN PLASTINEN LEIKKAUSKESTÄVYYS ON PIENEMPI, KUIN POIKKILEIKKAUKSEN LEIKKAUSKESTÄVYYS, KUN LEIKKAUSLOMMAHTAMINEN JA LAIPPOJEN OSUUS ON OTETTU HUOMIOON.

Kuva 12. Esimerkki leikkauslommahduksen laskennasta

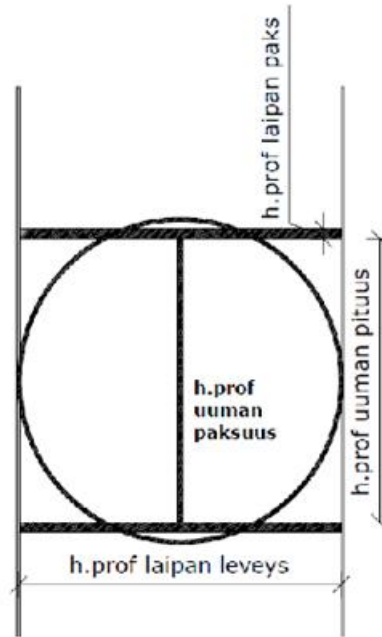
4.7 Kriittisen pisteen puristus

Riippuen mitoitettavan rakenteen koosta ja kerroslukumäärästä, saattaa WQ-ulokepalkin ulokkeen viereinen tukipiste tuoda ylemmistä kerroksista merkittäviä normaalivoimia. Esimerkkitalanteena voidaan pitää tilannetta, jossa WQ-palkki tukeutuu pilarin päälle, joka taas jatkuu WQ-palkin päältä ylempiin kerroksiin. Yksiaukkoisen palkin tilanteessa palkit tukeutuvat tukipisteen molemmille puolille (kuva 13). WQ-palkin päätylevyt siirtävät normaalivoiman alemmalle kerrokselle. Yksiaukkoisen palkin tapa-

uksessa kuitenkin ehkä kaikkein yleisin liitos pilariin on kannakelevyliitos, jossa pultit kannattelevat WQ-palkkia. Tätä liitosta käsitellään lisää luvussa 8. Ulokepalkin tapauksessa palkki jatkuu tukipisteen yli, jolloin kuormien siirto päätylevyillä ei onnistu. Kyseisessä tilanteessa, normaalivoiman suuruudesta riippuen, täytyy WQ-palkkia vahvistaa tukipisteen kohdalla. Yksi mahdollinen tapa toteuttaa palkin vahvistus on palkin sisään asennettava H-profiili (kuva 14).



Kuva 13. Momenttivapaa tuki, missä päätylevyt vievät pilarikuorman alemmille kerroksille



Kuva 14. WQ-palkki ylittää pyöreän liittopilarin, jonka kohdalla hitsattu H-profiili.

Vahvistetun poikkileikkauksen puristuskestävyyden laskenta voidaan suorittaa seuraavalla kaavalla:

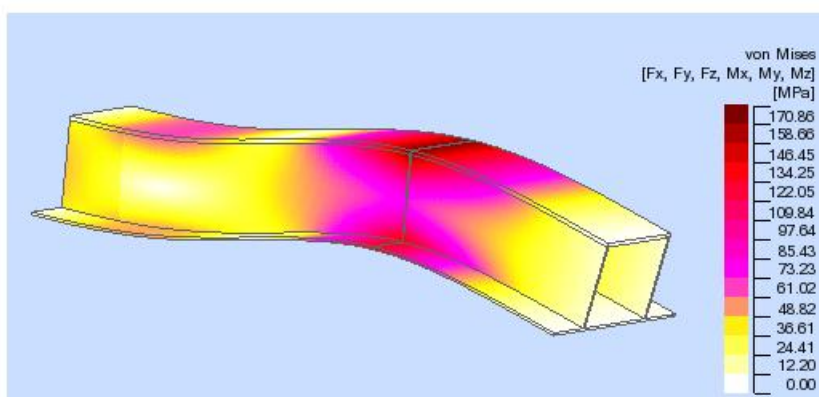
$$N_{pl,Rd} = \frac{A_{h.prof} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (53)$$

H-profiili valetaan juotosbetonilla täyteen, jolloin voidaan katsoa teräslevyjien olevan tuetut lommahdusta ajatellen. Teoriassa puristus jakautuu tuen kohdalla juotosbetonin ja teräksen jäykkyyksien suhteessa, jolloin teräksen osuutta normaalivoimasta voitaisiin pienentää. Toimenpiteellä saavutettu hyöty on kuitenkin melko pieni, ja oletus edellyttää juotosvalun täydellisen onnistumisen siten, että WQ-palkin ylälaipan ja valupinnan väliin ei jää tyhjää tilaa.

5 Käyttörajatilan tarkastelut

5.1 Kriittinen piste

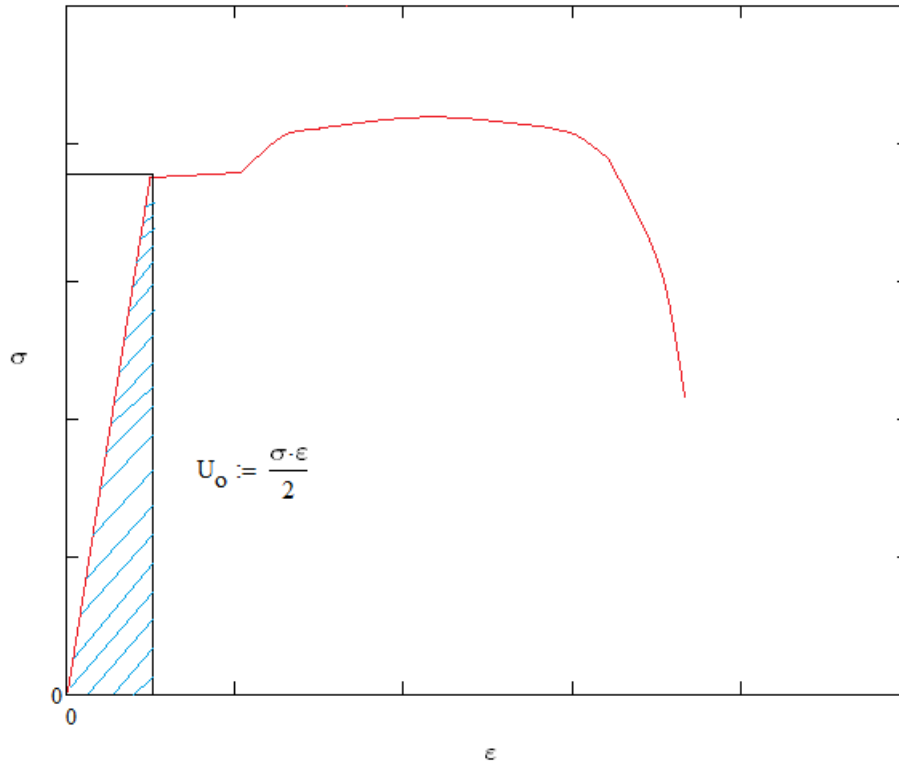
Kriittisellä pisteellä tarkoitetaan tässä yhteydessä pistettä ja sitä poikkileikkausta, mihin vaikuttaa samanaikaisesti eniten rasituksia. Ulokepalkin tapauksessa kriittiseksi pisteeksi muodostuu ulokkeen viereinen tuki. Yksiaukkoisesta palkista poiketen tähän poikkileikkaukseen vaikuttaa samanaikaisesti suuri leikkausvoima sekä taivutusmomentti. Näiden kuormitusten lisäksi poikkileikkauksessa vaikuttaa vääntö, mikä huomioidaan lähinnä lisäleikkausvoimana, sekä poikittainen taivutus, mikä rasittaa alalaippaa. Seuraava kuva 15 havainnollistaa kriittisen pisteen ja sen jännityksen.



Kuva 15. Kriittinen piste ja käyttörajatilan jännitykset

5.1.1 Pinnanvääristymisenergiaperiaate rajatilajännityksen tarkastelussa

Kun kappaletta kuormitetaan, kuorma tekee työtä ja muuttuu potentiaalienergiaksi. Tätä energiaa voidaan kutsua muodonmuutosenergiaksi. Ongelmaa voidaan jäsentää kuvittelemalla, että kuution muotoisen kappaleen jokainen tahko toimii kuten jousi; kun kappaletta puristetaan tai venytetään, kappale venyy tai puristuu ja kappaleen muoto muuttuu. Muodon muuttaminen aiheuttaa kappaleeseen jännityksiä, jotka vapautuvat kuormituksen vaikutuksen lakattua. Tämä toki edellyttää, että jännitykset eivät ylitä kriittisiä raja-arvoja, eli liikutaan kimmoisella alueella.



Kuva 16. Kimmoisen tilan venymän ja jännityksen suhde

Kuvassa 16 on esitetty yksiakselisen tapauksen mukainen muodonmuutosenergia. Kun ongelma siirretään 3-D-tapaukseksi, voidaan muodonmuutosenergia esittää seuraavasti:

$$U_0 = \frac{1}{2} * (\delta_x \varepsilon_x + \delta_y \varepsilon_y + \delta_z \varepsilon_z + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx} + \tau_{xy} \gamma_{xy})$$

Kun koordinaattiakselia käännetään siten, että se on samansuuntainen pääjännityksien kanssa, kaikki leikkausjännityksien komponentit supistuvat pois. Kun tämä suoritetaan, yhtälö muuttuu seuraavanlaiseksi:

$$U_0 = \frac{1}{2} * (\delta_1 \varepsilon_1 + \delta_2 \varepsilon_2 + \delta_3 \varepsilon_3)$$

Toisaalta tiedetään, että jännityksellä ja muodonmuutoksella on lineaarinen yhteys elastisella alueella. Esimerkiksi pääjännityksien tapauksessa jännitykset ja muodonmuutokset ovat:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\delta_1 - \nu * \delta_2 - \nu * \delta_3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\delta_2 - \nu * \delta_1 - \nu * \delta_3)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} (\delta_3 - \nu * \delta_1 - \nu * \delta_2)$$

Sijoitetaan tämä pääjännitysten mukaiseen muodonmuutosenergian kaavaan ja sievennetään yhtälö:

$$U_0 = \frac{1}{2 * E} * [\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 - 2\nu(\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_1\delta_3).]$$

Muodonmuutosenergiaa voidaan ajatella kahtena eri osana, joista toinen on tilavuudenmuutosenergia ja toinen on pinnanvääristymisenergia. Jotta muodonmuutosenergiaa voitaisiin käsitellä, jaetaan jännitysmatriisi samalla periaatteella komponentteihin, jolloin saadaan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2d} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3d} \end{bmatrix}$$

Missä alaindeksi h kuvaa hydrostaattista, tilavuutta pienentävää osaa ja alaindeksi d kuvaa pintaa vääristävää osaa jännityksestä. Koska tilavuudenmuutos on verrannollinen normaalijännityskomponenttien summaan, ja pinnan vääristymää aiheuttavien komponenttien täytyy aiheuttaa vääristymä ilman tilavuuden muutosta, täytyy pinnanvääristymiskomponenttien summan olla nolla. Näiden seikkojen nojalla hydrostaattinen jännitys voidaan lausua myös toisin:

$$\sigma_h = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{3} = \frac{\delta_{xx} + \delta_{yy} + \delta_{zz}}{3}$$

Tilavuudenmuutosenergia voidaan lausua myös muodonmuutosenergian kaavan avulla siten, että sijoitetaan muodonmuutosenergian lausekkeeseen pääjännityksien tilalle hydrostaattinen jännitys. Tämän toimenpiteen varjolla tilavuudenmuutosenergiaksi saadaan:

$$U_h = \frac{1}{2 * E} * [3 * \delta_h^2 - 2\nu(3 * \delta_h^2)] = \frac{3}{2} * \frac{(1-2\nu)}{E} * \delta_h^2$$

Sijoittamalla lausekkeeseen edelleen hydrostaattisen jännityksen kaava pääjännityksen avulla lausuttuna saadaan:

$$U_h = \frac{3}{2} * \frac{(1-2\nu)}{E} * \left(\frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{3}\right)^2$$

Sieventämällä saadaan:

$$\frac{1-2\nu}{6 * E} * [\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 - 2(\delta_1\delta_2 + \delta_2\delta_3 + \delta_1\delta_3).]$$

Koska tiedetään, että muodonmuutosenergian täytyy olla pinnanvääristymisenergian ja tilavuudenmuutosenergian summa, saadaan pinnanvääristymisenergialle lauseke, joka on muotoa:

$$U_p = U_0 - U_h ,$$

mistä taas saadaan sijoittamalla edellä johdetut lausekkeet kaavaan:

$$U_p = \frac{1+\nu}{3 * E} (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 - \delta_1\delta_2 - \delta_2\delta_3 - \delta_1\delta_3) ,$$

mistä saadaan edelleen sieventäen:

$$U_p = \frac{1+\nu}{3 * E} * \frac{(\delta_1 - \delta_2)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 + (\delta_3 - \delta_1)^2}{2}$$

Von Misesin jännitys pääjännityksien mukaisessa koordinaatistossa on seuraavaa muotoa:

$$\delta_{VM} = \sqrt{\frac{(\delta_1 - \delta_2)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 + (\delta_3 - \delta_1)^2}{2}}$$

Näin ollen voidaan kirjoittaa pinnanvääristymisenergian lausekkeeseen:

$$U_p = \frac{1+\nu}{3 * E} * \delta_{VM}^2$$

Von Misesin teorian mukaan materiaali myötää, kun sen pinnanvääristämisenergia on suurempi tai yhtä suuri kuin materiaalin kriittinen myötöraja.

Tästä seuraa, että voidaan lausua materiaalin kestävyydelle seuraava ehto:

$$\frac{1+\nu}{3 \cdot E} * \delta_{VM}^2 \leq \frac{1+\nu}{3 \cdot E} * \delta_Y^2,$$

mistä saadaan edelleen sieventäen:

$$\delta_{VM} \leq \delta_Y$$

Koska ehdon täytyy olla voimassa myös yksiakselisessa tapauksessa, voidaan materiaalien kriittiset myötöjännitykset osoittaa yksinkertaisin vetokokein [5].

5.1.2 Kriittisen pisteen käyttörajatilan jännitykset (von Mises)

Kriittisen poikkileikkauksen kriittinen piste sijaitsee poikittain taivutetun alalaipan alapinnassa, uuman juuressa. Kyseisessä pisteessä vaikuttava jännitys muodostuu alalaipan alapinnan puristuksesta poikittaisesta taivutuksesta, y-akselin suhteen tapahtuvasta taivutuksesta syntyvästä puristuksesta alalaipan alapinnassa sekä leikkausvoiman ja väännön aiheuttamasta leikkausjännityksestä. Jännitykset voidaan laskea seuraavien kaavojen avulla:

$$\sigma_x = -\frac{M_{y.k}}{W_{wq.t}} \quad (48)$$

missä:

$$W_{wq.t} = \frac{I_{y.wq}}{z_{wq}}$$

Alaindeksi "wq" korvataan poikkileikkausluokan mukaisella alaindeksillä pl tai el.

$$\sigma_y = -\frac{M_{p.k}}{\left(\frac{1000mm \cdot t_{f2}^3}{12}\right)} \frac{t_{f2}}{2} \quad (49)$$

missä:

$M_{p,k}$ on raskaammin kuormitetun alalaipan epäkeskisen kuormituksen aiheuttama taivutusmomentti metriä kohden $[\frac{kN*m}{m}]$.

$$\tau_k = \frac{V_k * S_{wq}}{I_{y,wq} (2t_w + a_{hitsi})} \quad (50)$$

missä:

a_{hitsi} on uuman ja alalaipan välisen hitsin a-mitta (0 mm varmalla puolella)

S_{wq} on staattinen momentti alalaipan yläpinnassa, mikä saadaan kaavasta:

$$S_{wq} = t_{f2} b_{f2} \left(z_{wq} - \frac{t_{f2}}{2} \right) \quad (51)$$

Jännityksiä ei voida sellaisenaan laskea yhteen, vaan niiden yhteisvaikutus täytyy tarkastella erikseen. Jännitysten yhteisvaikutuksen tarkastelemiseksi hyödynnetään von Misesin yhteisvaikutuksen yhtälöä, joka on yleisessä koordinaatistossa seuraavaa muotoa:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3\tau_k^2} \quad (52)$$

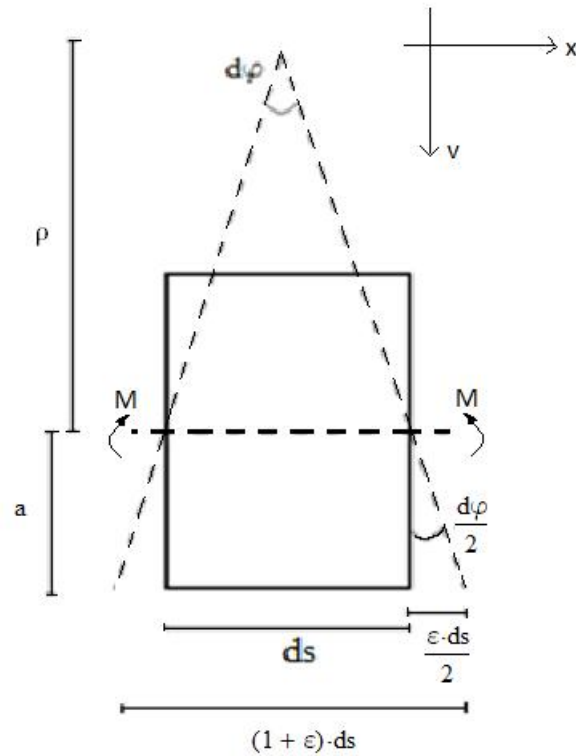
Kapasiteetin tarkistamiseksi voidaan kestävyydelle kirjoittaa seuraava ehto:

$$\frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3\tau_k^2}}{f_y} \leq 1.0$$

Yleisesti voidaan todeta, että suurimman jännityksen aiheuttaa y-akselin suhteen tapahtuva taivutus, mutta joissakin tapauksissa myös leikkausjännitykset ja poikittainen taivutus voivat kasvaa merkittävän suuriksi. Esimerkkinä reunapalkin tapaus, jossa poikittaisen taivutuksen ja varsinaisen taivutuksen välinen ero pienenee yksipuolisen kuormituksen johdosta.

5.2 Taipumaviivan differentiaaliyhtälö

Tarkastellaan hyvin pientä osaa tai "palkkialkiota" ja sen muodonmuutosta taivutusmomentin vaikutuksesta (kuva 17).



Kuva 17. Palkkialkion tasogeometria

Kaarevuussäteen ρ avulla alkion leveys ds voidaan lausua seuraavasti:

$$ds = \rho * d\varphi$$

Lausekkeesta voidaan johtaa myös:

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{\rho} \quad (53)$$

Palkkialkion alareunan venymä voidaan samalla periaatteella lausua seuraavasti:

$$d^2s = \left(\frac{d\varphi}{2}\right) a + \left(\frac{d\varphi}{2}\right) a = d\varphi * a \quad (54)$$

Palkin alareunan venymä on pituuden muutoksen ja alkuperäisen pituuden suhde. Merkitään tämä yleisesti tunnetussa muodossa:

$$\varepsilon = \frac{d^2s}{ds}$$

Toisaalta on todettu, että $d^2s = d\varphi * a$, joten:

$$\varepsilon = \frac{d\varphi * a}{ds} \quad (55)$$

Lujuusopin mukaan alareunan jännitys voidaan lausua momentin avulla:

$$\sigma = -\frac{M}{I} a$$

Etumerkki tässä yhteydessä voidaan selittää tilanteen mukaisilla suuntakonventioilla. Toisaalta venymä voidaan Hooken lain mukaan lausua:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Sijoittamalla jännityksen lauseke venymän lausekkeeseen, saadaan:

$$\varepsilon = -\frac{M * a}{E * I} \quad (56)$$

Voidaan todeta lausekkeet 55 ja 56 yhtä suuriksi mistä saadaan:

$$\frac{d\varphi * a}{ds} = -\frac{M * a}{E * I} \quad (57)$$

Kertomalla yhtälö $\frac{1}{a}$ ja sijoittamalla $\frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{\rho}$ saadaan:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{M}{E * I} \quad (58)$$

Kaarevuussäde voidaan lausua yleisessä muodossa:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (59)$$

Toteamalla lausekkeet 58 ja 59 yhtä suuriksi, saadaan:

$$\frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{M}{E \cdot I} \quad (60)$$

Yleisesti voidaan sanoa, että palkkeja käsiteltäessä koordinaatisto palkille asetetaan siten, että sen positiivinen z:n suunta on alaspäin. Taipumaviivan derivaatta $\frac{dv}{dx}$ on häviävän pieni, sillä taipumat ovat palkin muihin dimensioihin nähden pieniä ja taipumaviiva laakea, joten taipuman derivaatta jää pieneksi. Taipuman derivaatan neliö on näin ollen jo hyvin pieni, ja se voidaan suurta virhettä tekemättä jättää yhteen verrattuna pois yhtälön vasemman puolen nimittäjästä (kuva 18). Tähän perustuen voidaan todeta:

$$\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 \ll 1,$$

mistä seuraa taipumaviivan yksinkertainen linearisoitu muoto:

$$\frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{1} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

Tämän perusteella siis saadaan taipumaviivan differentiaaliyhtälö, joka on yleisesti muotoa:

$$v''(x) = -\frac{M}{E \cdot I} \quad (61)$$

Kaavan 61 avulla voidaan johtaa momentin lausekkeesta taipumaviivan yhtälöt [5].

Given

$$E_s := 210000$$

$$I_s := 329249240$$

$$L_1 := 8000$$

$$q := 50$$

$$M(x) := \frac{q \cdot L_1 \cdot x}{2} - \frac{q \cdot x^2}{2}$$

$$v(0) = 0$$

$$v(8000) = 0$$

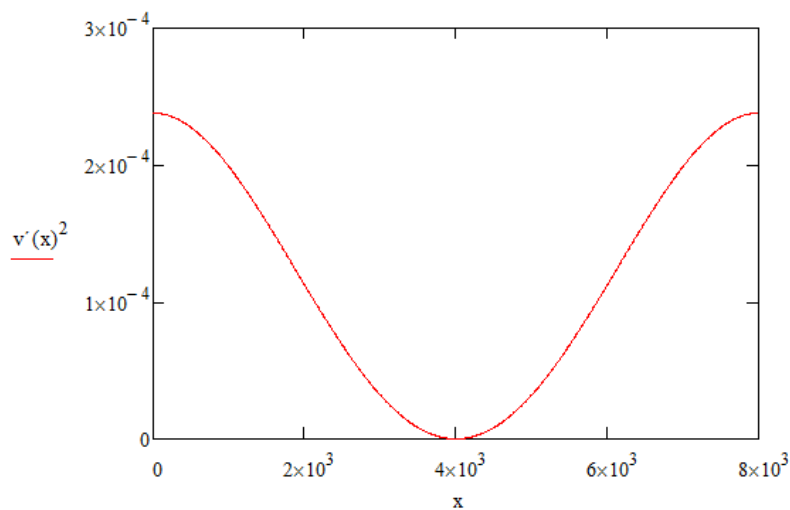
$$\frac{d^2}{dx^2} v(x) = \frac{-M(x)}{E_s \cdot I_s}$$

$$v := \text{Odesolve}(x, L_1) \quad v_{\max} := v\left(\frac{L_1}{2}\right) \text{ mm} \quad \frac{5q \cdot L_1^4 \text{ mm}}{384 \cdot E_s \cdot I_s} = 38.568 \text{ mm}$$

$$v_{\max} = 38.568 \text{ mm}$$

TAIPUMAVIIVAN DERIVAATTA x:n FUNKTIONA:

$$v'(x) := \left(\frac{q \cdot L_1 \cdot x^2}{4} - \frac{q \cdot x^3}{6} - \frac{q \cdot L_1^3}{24} \right) \cdot \left(\frac{1}{E_s \cdot I_s} \right)$$

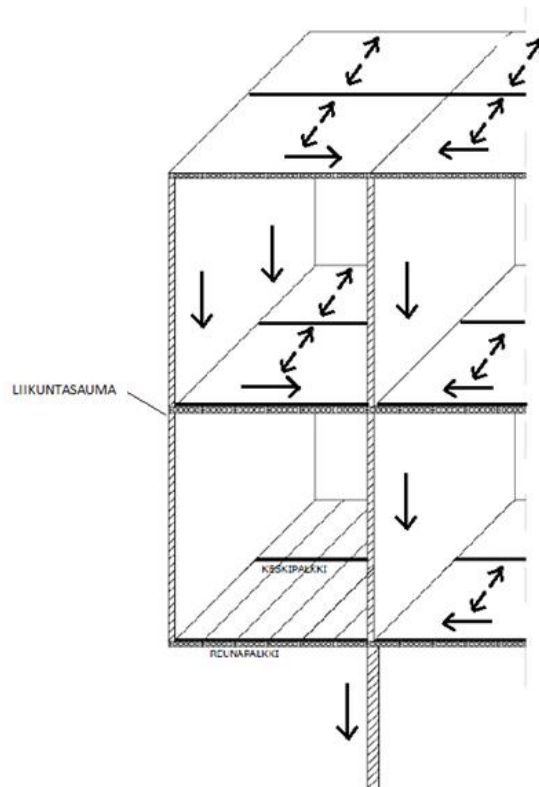


Kuva 18. Taipuman differentiaaliyhtälö, erään tapauksen taipuma ja kiertymän neliö [Liite 3.]

5.3 Ulokepalkin taipuma

Ulokepalkin taipumaa tarkasteltaessa ja sitä rajoitettaessa merkityksellistä on ulokkeen pään taipuma. Tämä johtuu siitä, että rakennemallin mukaan ulokkeen päässä vaikuttava pistevoima kertyy vain yhden kerroksen seinän painosta ja palkki siirtää kuorman tuen kautta alempaan kerrokseen (kuva 19). Mikäli uloke taipuu huomattavan paljon

alaspäin, alkaa alemman kerroksen ulokkeen pään seinä kannatella ylemmän kerroksen kuormia. Tämä ei käy laatuun ensinkään palkin kestävyyttä ajatellen, eikä toiseksi ulokkeen pään seinän liikuntasauvojen kapasiteetin puitteissa. Ulokepalkin taipumia laskettaessa on tärkeää ottaa huomioon se seikka, että kentän kuormitus pienentää ulokkeen taipumaa ja ulokkeen kuorma pienentää kentän taipumaa. Tämä on lopputilannetta ajatellen otollista, mutta asennuksen aikana kuormitukset saattavat olla epäedulliset. Lisäksi lopputilanteessa vaikuttavan hyötykuorman liikkuvuus tulee huomioida taipumia laskettaessa.



Kuva 19. Ontelolaatatot ja seinät siirtävät kuormat WQ-palkeille kerroksittain

WQ-ulokepalkkilaskuria ajatellen tarvitaan siis lauseke ulokkeen sekä kentän taipumille. Tämän lisäksi täytyy kartoittaa erilaiset mahdolliset kuormitustapaukset. Kuvassa 20 on esitetty luvun 5.2 mukaisilla menetelmillä johdettu taipuman lauseke.

$$\left(\frac{F_{2,taip} \cdot b_b \cdot x^3}{6 \cdot L_2} + \frac{F_{2,taip} \cdot b_{F,2} \cdot x^2}{2} + \frac{F_{2,taip} \cdot L_2^2 \cdot x}{6} - \frac{F_{2,taip} \cdot b_{F,2} \cdot L_2 \cdot x}{2} - \frac{F_{2,taip} \cdot b_b \cdot L_2 \cdot x}{6} - \frac{F_{2,taip} \cdot b_{F,2} \cdot x^3}{6 \cdot L_2} \right) \cdot \frac{-1}{E_s \cdot I_{y,wq,el}} \quad \text{if } 0m < x \leq b_{F,2}$$

Kuva 20. WQ- palkin kentässä vaikuttavan pistevoiman aiheuttama taipuma

Kuvan 20 kaava kuvaa kentän pistevoiman kenttään aiheuttamaa taipumaa x :n funktiona. Yhtälö on voimassa ulokkeettoman pään tuelta aina pistevoimaan asti. Pistevoiman kohdalla momenttiyhtälössä on epäjatkuvuuskohta, jonka jälkeen sama momenttiyhtälö ei ole enää voimassa. Pistevoiman jälkeen taipumalle pätee toinen lauseke, joka on ratkaistu pistevoiman jälkeen voimassa olevan momenttiyhtälön pohjalta.

Käytännössä WQ-palkin ulokkeella ja kentässä vaikuttaa tasan jakautuneet kuormat, joiden suuruudet eivät molemmilla palkin osilla välttämättä ole yhtä suuret. Tämän seurauksena palkin kentälle ja ulokkeelle johdetut momentin lausekkeet ovat hyvin pitkiä (Liite 4). Näistä yhtälöistä voidaan johtaa taipumaviivalle lausekkeet.

Suurin ongelma taipuman tarkassa määrittämisessä lienee kentän taipuman maksimiarvon sijainti. Ulokkeen kuormitukset aiheuttavat kenttään negatiivista taipumaa, jonka suurin arvo sijaitsee jossain palkin keskikohdan ja ulokkeen viereisen tuen välillä. Kuormitustapauksesta riippuen taipuman derivaatan yhtälö on kolmatta astetta, mikä tekee lausekkeen nollakohdan määrittämisestä käsin laskennalla vähintään haastavaa. Lisäksi se seikka, että kentän pistevoima saattaa sijaita missä kohdassa jännettä tahansa, asettaa erityisen haasteen taipumaviivan derivaatan nollakohdan löytämiselle. Laskentaohjelmaa ajatellen tämä johtaa tilanteeseen, jossa tapauksien pohjalta täytyy kirjoittaa useita jos-lauseita, mitkä määrittelevät kulloisenkin tapauksen kriittiset arvot. Kuvassa 21 on ote taipuman maksimiarvon sijainnin määrittämisestä.

$$z_{12} := \left(-\frac{q_{2ol.taip} \cdot L_2^3}{24} - \frac{q_{2hyo.liik} \cdot L_2^3}{24} + \frac{q_{1hyo.liik} \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{q_{1ol.taip} \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{F_{1.taip} \cdot L_1 \cdot L_2}{6} + \frac{F_{2.taip} \cdot L_2^2}{6} - \frac{F_{2.taip} \cdot b_b \cdot L_2}{6} - \frac{F_{2.taip} \cdot b_{F,2} \cdot L_2}{2} - \frac{F_{2.taip} \cdot b_{F,2}^3}{6 \cdot L_2} \right) \cdot \frac{1}{kN \cdot m^2} = 23.428$$

$$z_{21} := 0 = 0 \quad z_{22} := (F_{2.taip} \cdot b_{F,2}) \cdot \frac{1}{kN \cdot m} = 0$$

$$J_{uuret1} := (z_4 \cdot x^3 + z_{31} \cdot x^2 + z_{21} \cdot x + z_{11}) = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{assume, } x = \text{RealRange}\left(0, \frac{L_2}{m}\right) \end{array} \right. \rightarrow 4.2653524261145376361$$

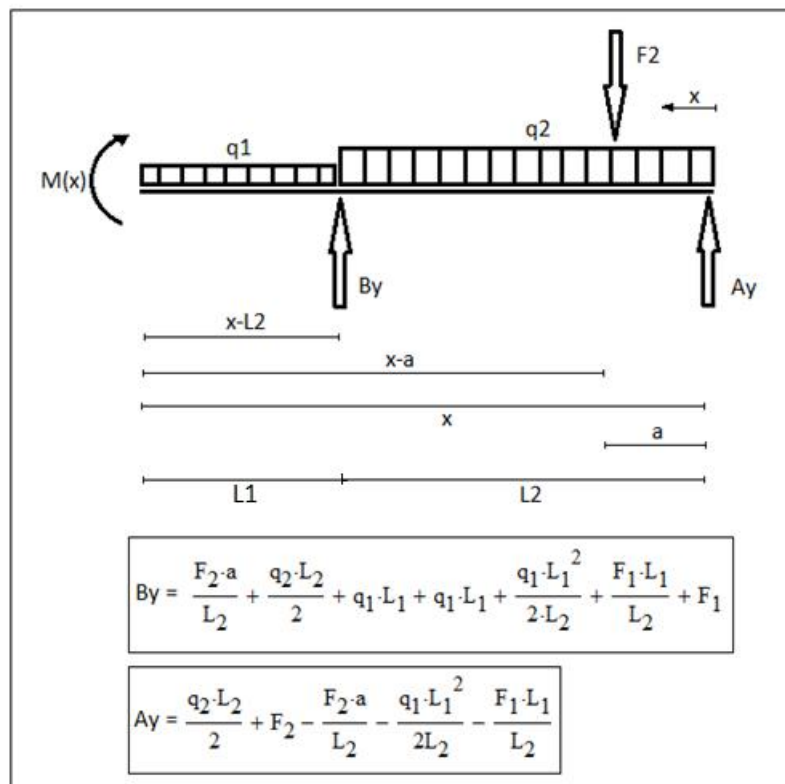
$$J_{uuret2} := z_4 \cdot x^3 + z_{32} \cdot x^2 + z_{22} \cdot x + z_{12} = 0 \quad \left| \begin{array}{l} \text{solve, } x \\ \text{assume, } x = \text{RealRange}\left(0, \frac{L_2}{m}\right) \end{array} \right. \rightarrow 4.2653524261145376361 = 4.265$$

$$x_{juuri_lopul11} := \max(J_{uuret1}) \cdot m = 4.265 \text{ m} \quad x_{juuri_lopul12} := \min(J_{uuret1}) \cdot m = 4.265 \text{ m}$$

$$x_{juuri_lopul21} := \max(J_{uuret2}) \cdot m = 4.265 \text{ m} \quad x_{juuri_lopul22} := \min(J_{uuret2}) \cdot m = 4.265 \text{ m}$$

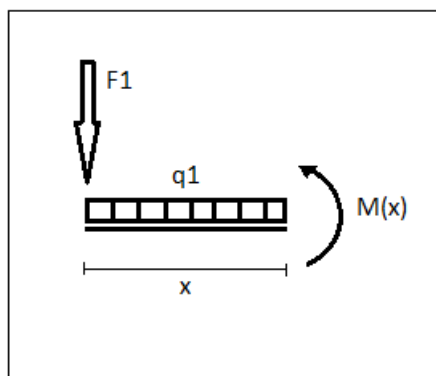
Kuva 21. Taipuman maksimiarvon määrittelyä eräässä tapauksessa

Jotta taipumaviiva voitaisiin piirtää yhteen kuvaajaan koko palkin osalta, täytyy kaikkien epäjatkuvuuskohtien jälkeisten momenttiyhtälöiden noudattaa samaa koordinaatistoa keskenään. Tämä asettaa haasteen varsinkin ulokkeen momenttiyhtälön kirjoittamiselle (kuva 22).



Kuva 22. Momenttiyhtälön muodostus ulokkeelle koordinaatistossa A

Kuvan 22 mukainen tilanne on kiusallisen haastelias verrattuna tilanteeseen, johon päästäisiin kirjoittamalla momenttiyhtälö ulokkeen vapaasta päädyistä (kuva 23).



Kuva 23. Momenttiyhtälön muodostus ulokkeelle koordinaatistossa B

Kuvan 23 mukainen momenttiyhtälö on erityisen yksinkertainen verrattuna kuvan 22 mukaiseen momenttiyhtälöön.

Ongelmallisen tilanteesta tekee seuraavan momenttiyhtälön muodostaminen. Jotta alkuperäisen ongelman mukainen, yhdessä kuvaajassa esitetty taipumaviiva olisi mahdollinen, palkin jokaisen osan momenttiyhtälön ja niistä johdettavien taipumaviivan yhtälöiden täytyy noudattaa samaa koordinaatistoa tai koordinaatistojen välille täytyy muodostaa muunnosyhtälö. Käsiteltävä ulokepalkin tapaus ratkeaa tässä yhteydessä helpoiten käyttämällä muunnosyhtälöä kahden eri koordinaatiston välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että kuvan 23 mukainen x korvataan muunnosyhtälöllä, joka on muotoa:

$$(L_1 + L_2) - x$$

Kuten nyt huomataan, mikäli kuvan 22 mukaiseen koordinaatistoon annetaan x :n arvoksi piste ulokkeen kärjessä, saadaan muunnosyhtälön arvoksi 0, sillä:

$$(L_1 + L_2) - (L_1 + L_2) = 0$$

Kun kaikkien epäjatkuvuuskohtien yli on muodostettu omat momenttiyhtälöt ja tarvittavat muunnosyhtälöt on kirjoitettu, voidaan taipumaviivan yhtälöt johtaa kaavan 61 differentiaaliyhtälöstä.

5.3.1 Reunaehdot taipumaviivalle

Kuten aikaisemmin todettiin, palkin matkalla on vähintään yksi epäjatkuvuuskohta, usein niitä kuitenkin on kaksi. Tämä edellyttää useampaa reunaehtoaa verrattuna tavanomaiseen yksiaukkoiseen tasaisesti kuormitettuun palkkiin. Tarvittavat reunaehdot, kun ulokkeen momenttiyhtälö kirjoitetaan vasemmalta oikealle ja kentän momenttiyhtälöt oikealta vasemmalle, ovat seuraavanlaisia:

$$v_1(0) = 0$$

$$v_2(L_2) = 0$$

$$v_1(a) = v_2(a)$$

$$v_1'(a) = v_2'(a)$$

$$v_3(L_2) = 0$$

$$v_3'(L_2) = -v_2'(L_2)$$

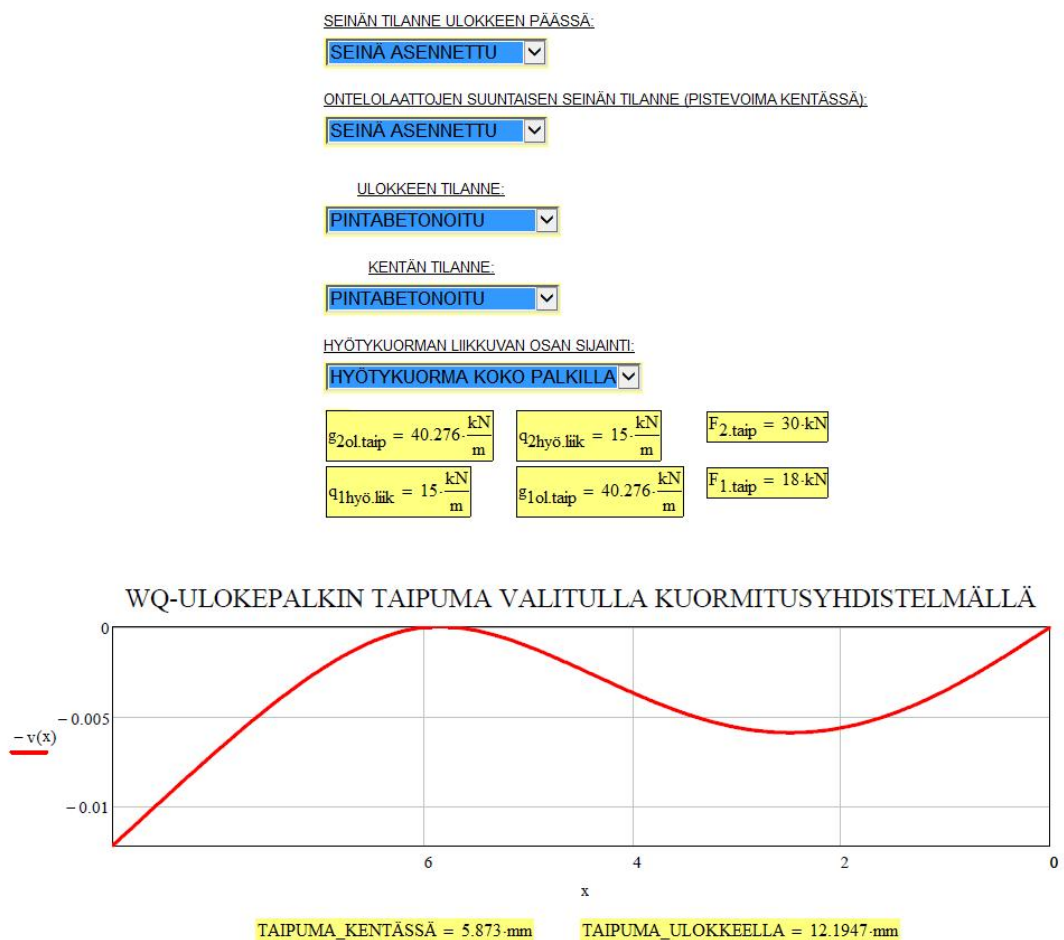
Kaikki muut edellä kuvatut reunaehdot ovat melko triviaaleja, eivätkä vaadi yksityiskohtaisempaa tarkastelua, mutta poikkeuksen tekee viimeinen edellisistä reunaehdoista. On erinomaisen huomionarvoista, että ulokkeelle kirjoitetun taipumaviivan lausekkeen mukaan laskettu kiertymä tuella B (katso kuva 22 ja By) on sama kuin kentän pistevoiman jälkeiselle osalle kirjoitetun taipumaviivan yhtälön mukaan laskettu kiertymä tuella B sillä erotuksella, että niiden suunnat ovat päinvastaiset. Toisen kiertymän negatiivinen arvo selittyy tällä seikalla, mikä taas on perusteltavissa koordinaatiston muutoksella. Noudattamalla "oikean käden koordinaatistoa" huomataan, että vaihtamalla positiivisen x:n suuntaa palkilla, vaihtuu y-akselin suhteen tapahtuvan positiivisen kiertymän suunta päinvastaiseksi. Laskentaa on käsitelty lisää liitteessä 5.

5.3.2 Taipuman muodostus ja superpositio

Superpositioperiaatteen mukaan kuormitus pisteessä a aiheuttaa pisteeseen c taipuman v_1 ja kuorma pisteessä b aiheuttaa pisteeseen c taipuman v_2 . Toisaalta, kun voimat pisteissä b ja a vaikuttavat samanaikaisesti, on pisteen c taipuma $v_1 + v_2$.

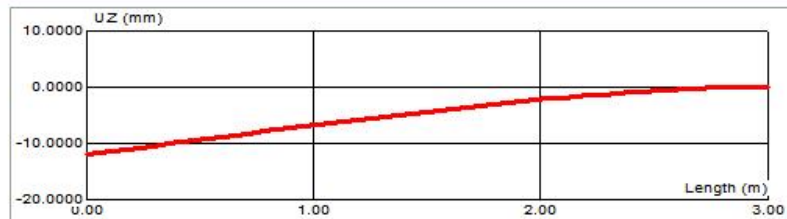
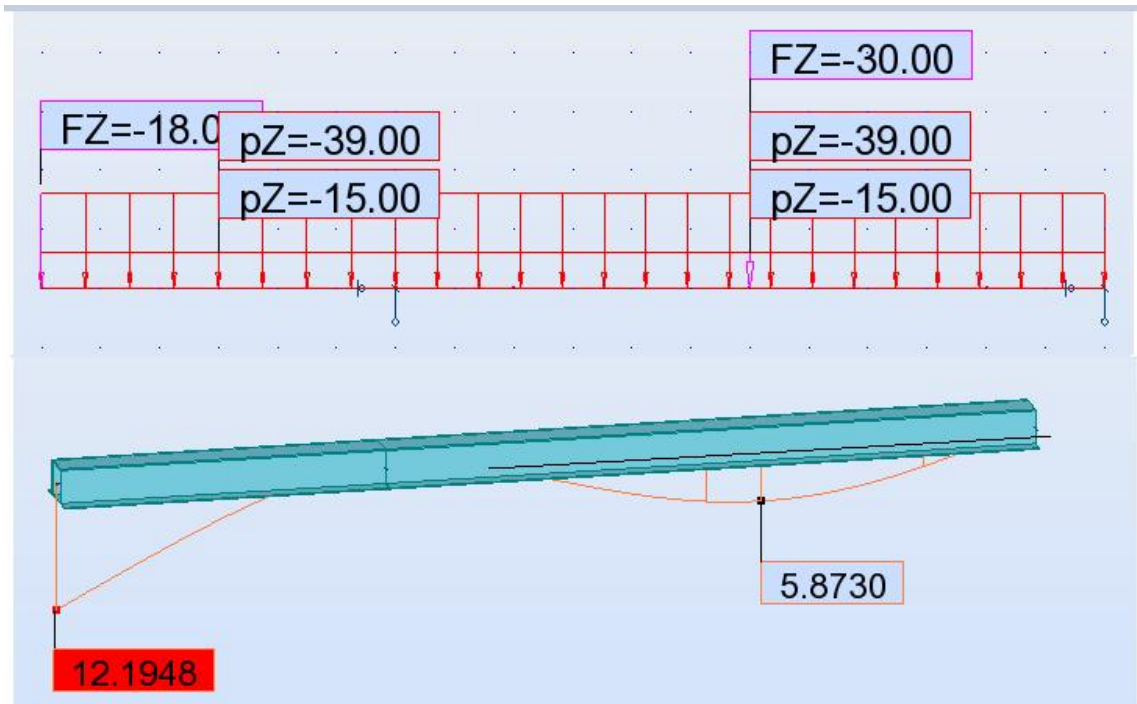
Superpositionin päteminen edellyttää, että kuormat ovat suhteutettuja palkin staattiseen kantokykyyn ja, että taipumat ovat pieniä. Superpositioperiaatteen varjolla voidaan siis ulokepalkin taipuman erillistapauksien yksinkertaistamiseksi laskea palkin taipumat ilman kentän pistevoiman vaikutuksia, ja lisätä pistevoiman vaikutus lopulliseen taipumaan summaamalla tämä lopputaipumaan superposition nojalla. Tällä tavoin toimiminen ei kuitenkaan poista sitä tosiasiaa, että ulokkeen tasaisen kuorman kenttään aiheuttama taipuma ei saa maksimiarvoa kentän keskelle ja, että kyseisen kuormituksen aiheuttaman kiertymän lauseke on kolmatta astetta. Kuitenkin superpositioperiaatteen puitteissa kuormia ositellen säästytään pitkiltä, yli 10 tekijän lausekkeilta. Tämä on suuri etu varsinkin integroimisvakioiden selvittämisessä.

Kuvassa 24 on kuvattu luvussa 5.3 (s. 41) esitetty kuvaaja, johon on piirretty koko WQ-palkin taipuma.



Kuva 24. Koko ulokepalkin taipuma yhdessä kuvaajassa

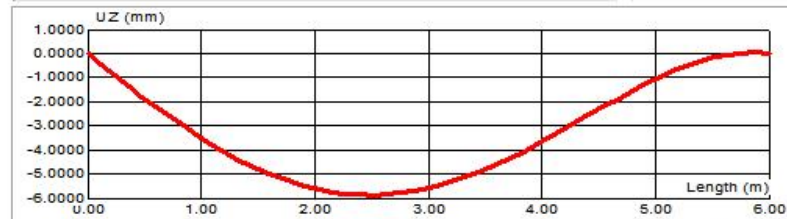
Taipumalle saadut tulokset on tarkastettu FEM-laskentaohjelmalla Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015. Vertailun tulokset on esitetty kuvassa 25.



Bar / Point (m)	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
Current value	0,0	0,0	-12,1948
for bar:	1		
in point:	x=0,0 (m)		

Diagram

- UX
- UY
- UZ



Bar / Point	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)
Current value	0,0	0,0	-5,8730
for bar:	2		
in point:	0,0	0,0	0,42

Diagram

- UX
- UY
- UZ

Kuva 25. Taipuma Autodesk Robot Structural Analysis Professional FEM-ohjelmalla

Edellä kuvattujen kahdella eri ohjelmalla suoritettujen taipumatarkastelujen esityksissä kuvissa 24 ja 25 on erona vain palkin omapaino. Robot-ohjelmaan omapaino on ohjelmoitu valmiiksi eikä ohjelma esitä sitä kuormituksena. WQ-ulokepalkkilaskurissa palkin omapaino on sisällytetty pysyviin kuormiin g_1 ja g_2 .

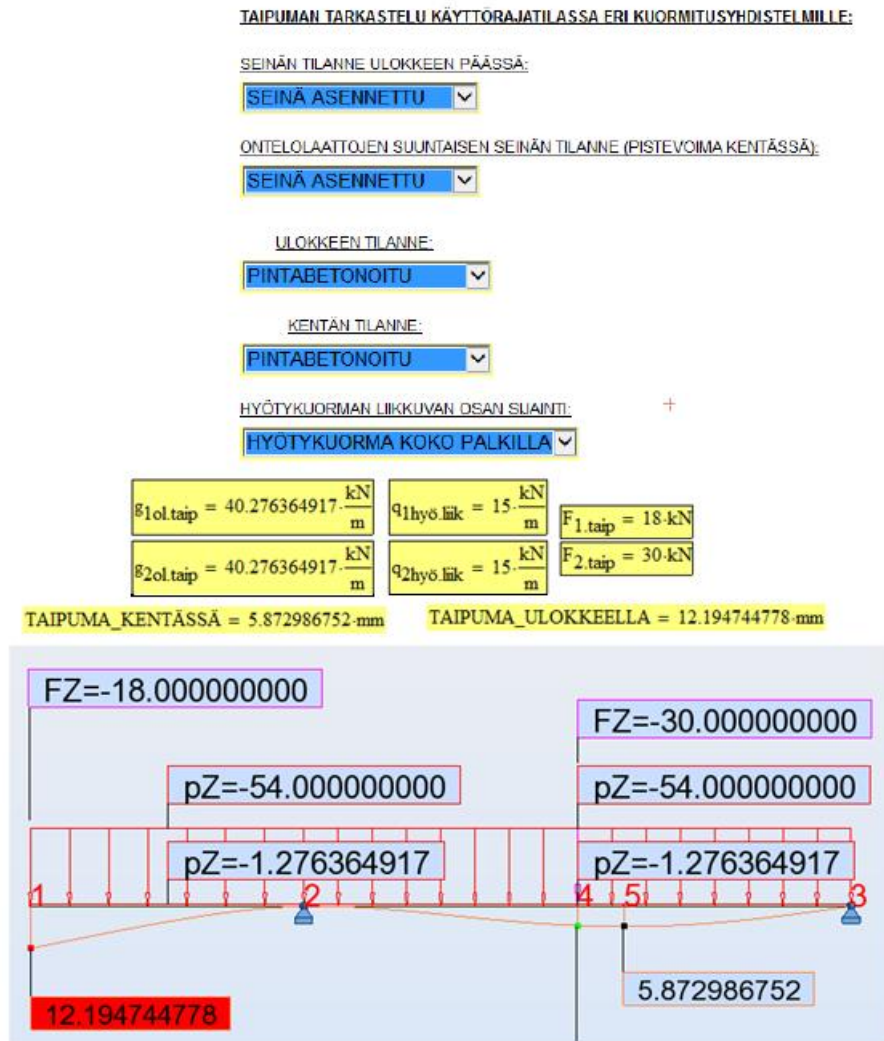
5.3.3 Johtopäätökset

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että oman laskennan tulos ja tarkastukseen käytetyn ohjelman (Robot) tulokset ovat likimain yhtä suuret. Useiden kuormitustapauksien ristiin tarkistuksen yhteydessä havaittiin, että hyvin pienet erot tapauksesta riippuen neljännessä tai viidennessä desimaalissa johtuvat siitä, että palkin oman painon määrittämisessä on pieni ero. Robot-ohjelma ilmoittaa erään tarkasteltavan palkin omaksi painoksi $77,01 \frac{kN}{m^3}$. Tämä onkin likimain sama, mikä saadaan samalle palkille käsin laskien käyttämällä teräkselle tiheyttä $7\,850 \frac{kg}{m^3}$. Toki olisi myös mahdollista, että FEM-ohjelman tuloksessa olisi huomioitu leikkausvoiman vaikutus. Yleisesti voidaan leikkausvoiman ja taipuman välisestä relaatiosta mainita, että kyseessä on hyvin pieni vaikutus. Leikkausvoiman vaikutus taipumaan korostuu erityisen korkeiden palkkien tapauksessa. Tämä ei kuitenkaan tässä tapauksessa selitä tilannetta, sillä poistamalla Robot-ohjelmasta automaattinen omapaino ja lisäämällä kaikki kuormat identtisinä WQ-ulokepalkkilaskurin suhteen, saadaan taipumaksi täysin sama tulos vähintään 9 desimaalin tarkkuudella (kuva 26).

Todettakoon vielä, että Robot-ohjelmasta joutui väkisin hakemaan tarkan suurimman taipuman arvon, sillä ohjelman sisäinen arvo suurimman taipuman sijainnille ei ollut tähän yhteyteen riittävän tarkka. Ohjelmaan täytyi ensin syöttää solmupiste itse käsin laskettuun suurimman taipuman paikkaan. Koska solmu sijaitti hyvin lähellä, tapauksesta riippuen noin 1–100 millimetrin päässä ohjelman omien laskelmien tuloksesta taipuman suurimman arvon paikalle, tyytyi ohjelma esittämään taipuman vain osoite-tussa pisteessä. On myös mahdollista, että ohjelman itsensä määrittelemän suurimman taipuman sijainnin tarkkuuden voi itse määritellä mielivaltaisen tarkaksi, mutta tähän ei nopealla etsinnällä ratkaisua löytynyt.

Todettakoon vielä, että normaalissa mitoitusilanteessa yli 0,1mm tarkkuus on aivan liian suuri ottaen huomioon kaikki todelliseen taipumaan vaikuttavat epätarkkuustekijät. Käytännössä 1 mm tarkkuus on riittävä. Tässä yhteydessä olikin vain tarkoitus toden-

taa, että yleisesti käytössä olevan kaupallisen statiikka ohjelman tulos ja laskentaperiaate eivät eroa suuresti WQ-ulokepalkkilaskurin menetelmistä. Tässä yhteydessä voitiin todeta, että WQ-ulokepalkkilaskurin tulos on täysin sama Robot-ohjelman tulokseen verrattuna, joskin WQ-ulokepalkkilaskurin tulos oli lähtökohtaisesti tarkempi ottaen huomioon Robot-ohjelman vaatimukset maksimitaipuman sijainnin tarkentamiseksi.



Kuva 26. Taipuma Robot Structural Analysis -ohjelmalla, tarkalla oman painon arvolla

6 WQ-palkin palomitoitus kriittisen lämpötilan mukaan

Eurokoodin osa SFS-EN-1993-1-2 käsittelee palomitoitusta. Tämän insinööriyön palomitoitusta käsittelevät osat pohjautuvat eurokoodiin, mutta eivät välttämättä sellaisinaan riitä täyttämään palomitoituksen vaatimuksia. Tässä työssä käsitellään erityisesti kriittisen lämpötilan laskentaa sekä teräksen lämpötilan nousua ajan funktiona, palosuojaamattomana sekä palosuojattuna. Lisäksi työssä käsitellään palotilanteen kuormien laskentaa sekä poikkileikkausluokan määrittely palotilanteessa. Palosuojattua poikkileikkausta koskevat ohjeet ja laskenta perustuvat teräsrakenneyhdistyksen varmennettuihin käyttöselosteisiin.

Olenneista on, että palomitoitusta ei välttämättä voi sellaisenaan suorittaa tämän työn ohjeiden mukaan, vaan se vaatii tapauskohtaisesti tarkempia tarkasteluja.

6.1 Poikkileikkausluokan laskenta palotilanteessa

Palotilanteessa poikkileikkausluokka määritellään täysin samoin perustein ja menetelmin kuin luvussa 3 esitetään. Erona normaalin tilanteen mitoituseseen on se, että palotilanteen rajajoikkuutta pienennetään 15 prosenttia. Tämä esitetään kaavana muodossa:

$$\varepsilon_{palo} = 0,85 * \sqrt{\frac{235MPa}{f_y}} \quad (62)$$

Tämä tarkoittaa siis sitä, että palotilanteessa ohuet levyosat ovat alttiimpia lommahtamaan paikallisesti. Usein tämä myös johtaa palotilanteen mitoituksessa kimmoteorian mukaisiin jännitystiloihin ja niistä johdettuihin suureisiin. [7.]

6.2 Palotilanteen kuormat

Palotilanteen kuormituksista hyötykuorman osuutta suositellaan eurokoodissa pienennettävän $\psi_{2.1}$ kertoimella, joka on esimerkiksi hyötykuorman luokissa A, B ja C (asuintilat, toimistotilat ja kokoontumistilat) 0,3.

$\psi_{2,1}$:n avulla määritellään palotilanteen kuormien pienennyskerroin η_{fi} , joka lasketaan seuraavin periaattein:

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{2,1} q_k}{\gamma_G g_k + \gamma_Q q_k} \quad (63)$$

Myös pistemäisten kuormien osalta tulee suorittaa vastaava yhdistely. Kertomalla murtorajatilan kuormitukset kertoimella η_{fi} saadaan palotilanteen kuormitukset. [7.]

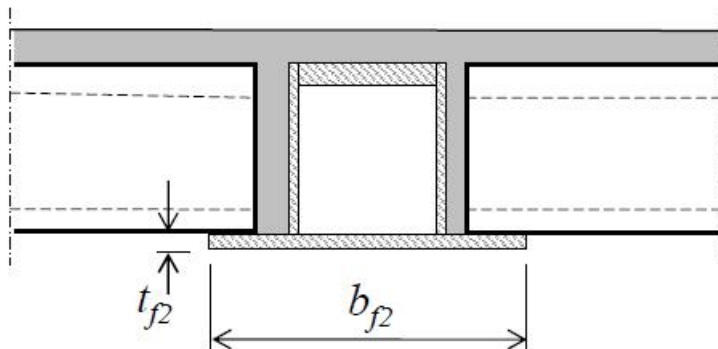
6.3 Palolle altistuvat osat ja hyväksikäyttöaste palotilanteessa

Palolle altistuvat osat ja teräksen lämpötilan laskennassa tarvittavan $\frac{A_m}{V_m}$ suhteen määrittämiseksi tarvitaan seuraavat kaavat:

$$A_m = b_{f2} + 2t_{f2} \quad (64)$$

$$V_m = b_{f2} t_{f2} \quad (65)$$

Edellä esitetyt suureet perustuvat palolle alttiiseen osaan poikkileikkauksesta, mikä voidaan havainnollistaa kuvan 27 avulla. [1.]



Kuva 27. Palolle alttiit osat poikkileikkauksesta [1.]

Teräksen kriittisen lämpötilan määrittämiseksi tarvitaan lisäksi palotilanteen hyväksikäyttöaste $\mu_{0,fi}$.

$$\mu_{0.fi} = \frac{E_{fi.d}}{R_{fi.d.0}} > 0,13 \quad (67)$$

missä:

$E_{fi.d}$ on palotilanteen taivutusmomentin mitoitusarvo

$R_{fi.d.0} = M_{y.Rd}$ on palkin suunnittelukestävyys palotilanteessa ajanhetkellä $t = 0$

6.4 Kriittinen lämpötila

Kriittisen lämpötilan toimintaperiaate määritellään eurokoodin osassa SFS-EN-1993-1-2 luvun 2.4.3 kohdan 3 mukaan. Menetelmä edellyttää, että rakenteen staattinen malli ei muutu ja mitoittavien voimasuureiden määrittämiseksi tarkasteltavat tukivoimat ja muut rakenteen kannalta olennaiset reunaehdot eivät muutu. Näin ollen rakenteen katsotaan menettäneen staattisen kantokykynsä silloin, kun lämmön aiheuttamat potentiaaliset pituudenmuutokset ja muodonmuutokset ylittävät niille asetetut raja-arvot.

Käytännössä kriittinen lämpötila on se lämpötila, jossa lämpötilan nousun vaikutuksesta pienenevä rakenneteräksen tehollinen myötöraja on kantokyvyn edellyttämää myötörajaa alhaisempi.

Kriittinen lämpötila voidaan laskea kaavasta:

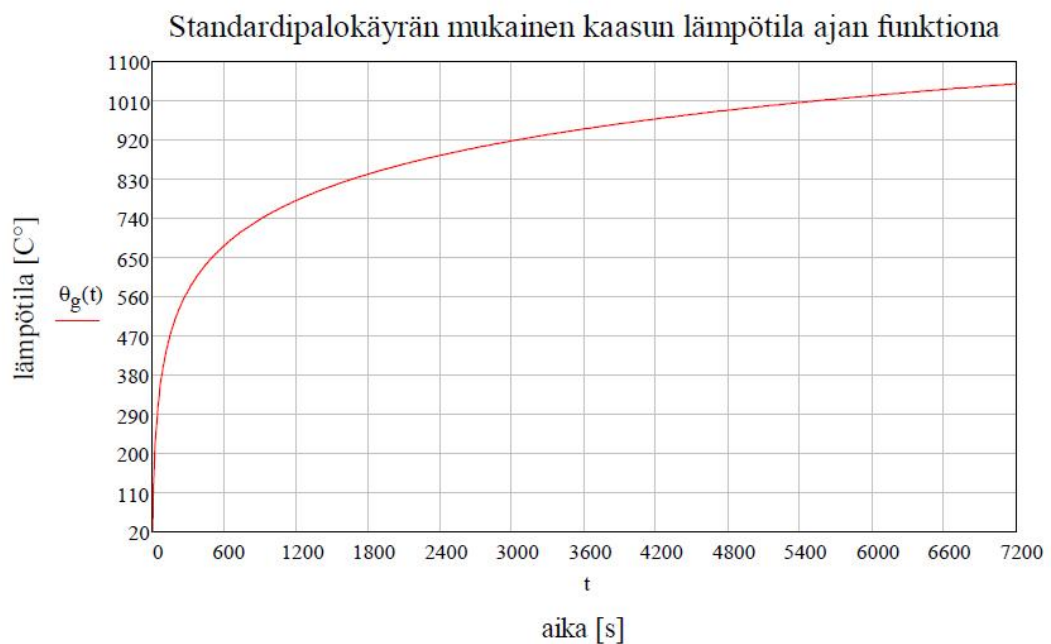
$$\theta_{a.cr} = 39,19 * \ln \left(\frac{1}{0,9674 * \mu_{0.fi}^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (68)$$

Huomioitavaa kuitenkin on, että rakenneteräksen tehollinen myötöraja alkaa alentua merkittävästi, kun teräksen lämpötila kohoaa yli 500 C° normaalilämpötilasta. Kun teräksen lämpötila on saavuttanut 600 C° rajan, on myötöraja pienentynyt jo yli 75 prosenttia. Näin ollen usein vaatii erityistä harkintaa ilmoittaa WQ-palkin kriittiseksi lämpötilaksi yli 600 C° , vaikka teoriassa kantavuutta vielä löytyisikin. [7.]

6.5 Palosuojaamattoman teräksen lämpötila ajan funktiona

Tässä insinööriyössä käsiteltävät teräksen lämpötilat perustuvat niin sanotun standardipalokäyrän mukaisen palokaasun lämpötilan nousuun. Standardipalokäyrällä tarkoitetaan yleisesti hyväksyttyä, varmallalla puolella olevaa käyrää, jolta voidaan lukea palotilan kaasun lämpötila ajan funktiona (kuva 28). Palotilan kaasun lämpötila voidaan laskea kaavasta:

$$\theta_g(t) = 20 + 345 * \log\left(\frac{8*t}{60} + 1\right) \quad (69)$$



Kuva 28. Standardipalokäyrä

Teräksen lämpötilan kehitystä laskettaessa tarvitsee määritellä seuraavat parametrit:

$\frac{A_m}{V_m}$ on poikkileikkaustekijä (kaava 64/65).

ρ_a on teräksen tiheys. Sen oletetaan pysyvän vakiona lämpötilasta riippumatta ja sille voidaan käyttää arvoa $8\,750 \frac{kg}{m^3}$.

c_a on teräksen ominaislämpökapasiteetti. Ominaislämpökapasiteetti on lämpötilariippuvainen suure.

k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjaustekijä, jonka voidaan olettaa olevan arvoltaan 1.

h_{net} on lämpövuoto, joka muodostuu säteilystä ja johtumisesta.

h_{net} voidaan laskea kaavasta:

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r}$$

missä:

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g(t) - \theta(t)) \quad (70)$$

missä:

$\alpha_c = 25 \frac{W}{m^2 C^\circ}$, johtumalla siirtyvän lämmön lämmönsiirtymiskerroin, kun mitoituspalo on standardipalo.

$\theta_g(t) - \theta(t)$ on kaasun lämpötilan ja teräksen lämpötilan erotus.

Tässä voidaan pitää huomionarvoisena sitä, että mikäli palotilan lämpötila on teräksen lämpötilaa alhaisempi, johtuu lämpö teräksestä palotilaan. Näin harvemmin kuitenkaan käy, mutta tämä tavallaan osoittaa kyseessä olevan puhtaasti fysikaalista ilmiötä kuvaava suure.

$$h_{net,r} = \phi * \varepsilon_f * \varepsilon_m * \sigma * [(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta(t) + 273)^4]. \quad (71)$$

missä:

ϕ on näkyvyyskerroin, voidaan käyttää arvoa 1.

ε_f on palotilan säteilykerroin, voidaan käyttää arvoa 1.

ε_m on rakenneosan säteilykerroin, rakenneteräkselle 0,7.

σ on Stefan Boltzmannin vakio, $5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

$h_{net,r}$ kuvaa siis infrapunasäteilynä siirtyvää osaa lämmön siirtymisestä palotilasta mitoitettavaan rakenteeseen. Kaavassa esiintyvä 273 kirjoitetaan siksi, että Stefan Boltzmannin vakion yksikkö ilmoitetaan yleisesti Kelvin-asteissa aivan kuten tässäkin yhteydessä.

Teräksen ominaislämpökapasiteetti on lämpötilaverrannollinen suure. Tästä johtuen ominaislämpökapasiteetin suuruus selvitetään useammalla eri yhtälöllä, joiden pätemisalueet ovat sidoksissa teräksen lämpötilaan. Ominaislämpökapasiteetti eri lämpötiloissa selvitetään seuraavien kaavojen avulla:

$$c_a = 425 + 0.773 * \theta - 1.69 * 10^{-3} * \theta^2 + 2.22 * 10^{-6} * \theta^3, \text{ kun } 20 \text{ C}^\circ \leq \theta_t < 600 \text{ C}^\circ \quad (72)$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta}, \text{ kun } 600 \text{ C}^\circ \leq \theta_t < 735 \text{ C}^\circ \quad (73)$$

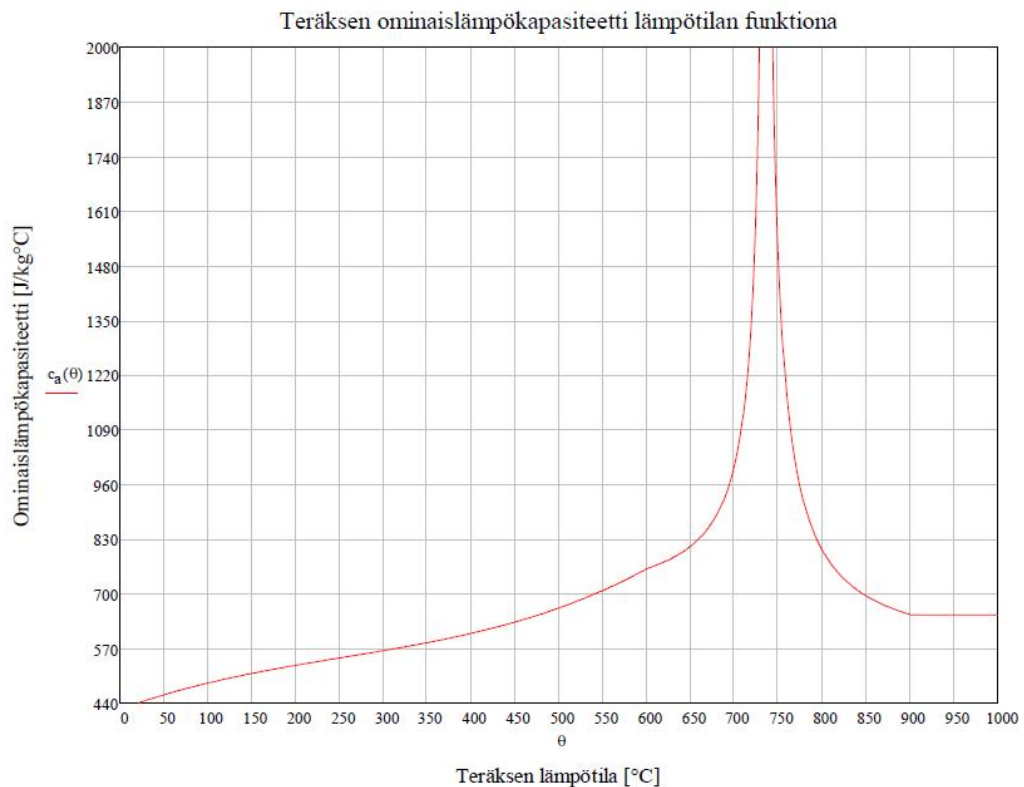
$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta - 731}, \text{ kun } 735 \text{ C}^\circ \leq \theta_t < 900 \text{ C}^\circ \quad (74)$$

$$c_a = 650, \text{ kun } 900 \text{ C}^\circ \leq \theta_t < 1200 \text{ C}^\circ \quad (75)$$

Tarkastelemalla ominaislämpökapasiteetin kaavoja voidaan tehdä muutamia havaintoja. Voidaan huomata, että kaavan 73 mukaan ominaislämpökapasiteetti divergoi, kun teräksen lämpötila nousee 738 celsiusasteeseen. Lausekkeiden pätemisalueet on rajattu siten, että ominaislämpökapasiteetin maksimiarvo on $5000 \frac{J}{kg * C^\circ}$. Kun toisen lausekkeen pätemisalueen yläraja saavutetaan, kaavan luonne muuttuu divergoituvasta suppenevaksi. Lämpötilan noustua noin 790 celsiusasteeseen alkaa ominaislämpökapasiteetin laskeminen taittua ja tasaantua.

Suuri nousu ominaislämpökapasiteetille voidaan selittää materiaalin magnetismiin liittyvällä ilmiöllä ja niin sanotulla Curie-pisteellä, usein myös Curien lämpötilana kutsutulla ilmiöllä. Rakenneteräksen lämpötilan noustessa Curien lämpötilaan, teräksen luontainen magneettinen momentti vaihtaa suuntaa. Tämä kuluttaa suuren määrän energiaa, joka siis näkyy teräksen ominaislämpökapasiteetissa. Palotilan lämpöenergia ”kuluu” magneettisen momentin suunnan kääntämiseen, jolloin tarvitaan enemmän energiaa jotta materiaalin lämpötila kohoaisi. [8.]

Kuvassa 29 on esitetty ominaislämpökapasiteetin suuruus lämpötilan funktiona.



Kuva 29. Teräksen ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona

Edellä esitettyjen suureiden avulla voidaan laskea teräksen lämpötilan muutos ajan funktiona seuraavasta kaavasta:

$$\Delta\theta = k_{sh} * \frac{A_m}{c_a \rho_a} * h_{net} * \Delta t$$

Laskennan helpottamiseksi voidaan kerätä ajasta ja lämpötilasta riippumattomat suureet yhdeksi vakiotermiksi:

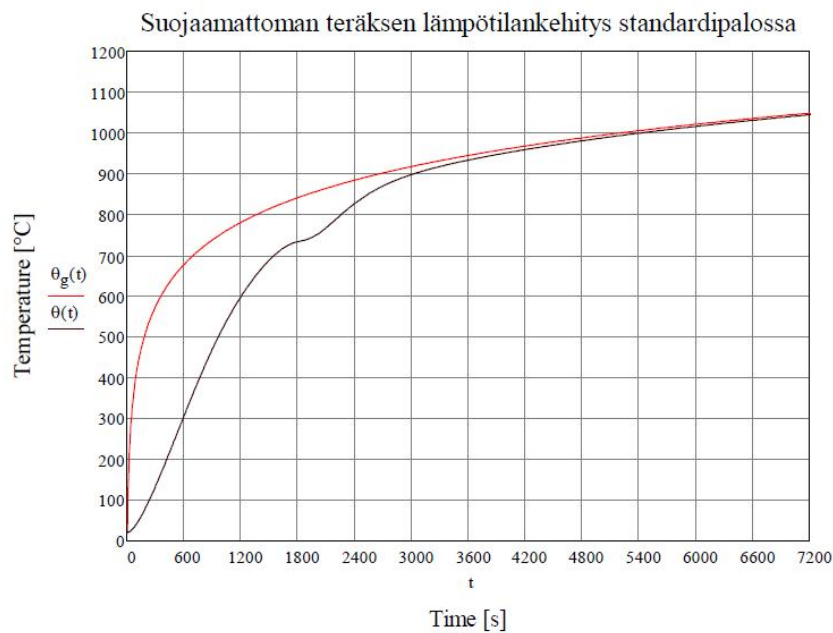
$$Z_{1t} = \frac{\frac{A_m}{V_m}}{\rho_a} \quad (76)$$

Jaetaan yhtälön molemmat puolet differentiaalilla ajasta, jolloin saadaan:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = Z_{1t} * \frac{h_{net}}{c_a} \quad (77)$$

Teräksen lämpötila on riippuvainen ominaislämpökapasiteetista sekä h_{net} :n arvosta. h_{net} :n arvo on riippuvainen ajasta (palotilan lämpötila) sekä teräksen lämpötilasta. Ominaislämpökapasiteetti on riippuvainen teräksen lämpötilasta. Tästä seuraa, että käsiteltävä differentiaaliyhtälö ei ole separoituva. Näin ollen yhtälö täytyy ratkaista numeerisesti. Kuvassa 30 esitetään suojaamattoman poikkileikkauksen lämpötilankehitys standardipalossa eräällä poikkileikkauksella. [7.]

$$\frac{d}{dt} \theta(t) = \begin{cases} z_{t1} \cdot \frac{\alpha_c \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) \right) - \theta(t) \right] + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) + 273 \right)^4 - (\theta(t) + 273)^4 \right]}{425 + 0.773 \cdot \theta(t) - 0.00169 \cdot \theta(t)^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta(t)^3} & \text{if } \theta(t) \leq 600 \\ z_{t1} \cdot \frac{\alpha_c \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) \right) - \theta(t) \right] + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) + 273 \right)^4 - (\theta(t) + 273)^4 \right]}{666 + \frac{13002}{738 - \theta(t)}} & \text{if } 600 \leq \theta(t) \leq 735 \\ z_{t1} \cdot \frac{\alpha_c \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) \right) - \theta(t) \right] + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) + 273 \right)^4 - (\theta(t) + 273)^4 \right]}{545 + \frac{17820}{\theta(t) - 731}} & \text{if } 735 \leq \theta(t) \leq 900 \\ z_{t1} \cdot \frac{\alpha_c \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) \right) - \theta(t) \right] + 3.969 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\left(20 + 345 \cdot \log \left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1 \right) + 273 \right)^4 - (\theta(t) + 273)^4 \right]}{650} & \text{if } 900 \leq \theta(t) < 1200 \end{cases}$$



Kuva 30. Teräslämpötilan differentiaaliyhtälöt sekä teräksen lämpötila ajan funktiona

6.6 Palosuojamateriaalit lyhyesti

Palosuojatuotteiden tarkoituksena on estää palotilanteessa lämmön siirtyminen kantavaan rakenteeseen siinä määrin, että rakenteen lämpötila ei nouse valittuna palonkestoaikana rakenteen kantavuuden kannalta kriittisen korkeaksi. Tämän toteuttaminen on mahdollista muutamilla erilaisilla menetelmillä. Palosuojaus voi perustua eristävytyteen tai lämmönsitomiskyvyn parantamiseen. Eristämällä lämpö estetään johtumasta ja säteilemästä suojattavaan rakenteeseen. Lämmönsitomiskykyä parantamalla rakenteen massaa pyritään lisäämään siten, että lämpötilan nouseminen vaatii enemmän energiaa.

Palosuojaus on lisäksi mahdollista toteuttaa rakenteellisesti. Tällä tarkoitetaan yksinkertaisesti sitä, että esimerkiksi kantavat pilarit rakennetaan palotilan ulkopuolelle tai seinien sisään.

Erilaisina palosuojamateriaaleina voidaan pitää:

- palosuojamaali
- mineraaliruiskutus
- betoni
- puu
- rappaus
- vesi.

6.6.1 Palosuojamaali

Palosuojamaalit toimivat normaalilämpötiloissa kuten tavallisetkin pintamaalit, mutta niiden tilavuus alkaa kasvaa, kun lämpötila nousee tuotteesta riippuen yli 250–300 celsiusasteeseen. Palon edetessä palosuojamaali paisuu ja hiiltyy pinnaltaan eristäen lämpöä siirtymästä kantavaan rakenteeseen.

6.6.2 Mineraaliruiskutus

Mineraaliruiskutteiden idea on palosuojamaalin ideaan verrattuna pääpiirteittäin sama. Mineraaliruiskutteet eivät usein kestä mekaanista rasitusta, minkä seurauksena ruiskute pinnoitetaan erikseen suojaamaan mekaaniselta rasitukselta esimerkiksi levyillä tai rappauksella.

6.6.3 Betoni

Betonia voidaan käyttää palosuojaukseen lähinnä lämmönsitomiskyvyn parantamiseen. Kun rakenteen massa kasvaa, kasvaa myös tarvittava energiamäärä, jolla rakenteen

lämpötila saadaan nousemaan. Lämpöenergiaa kuluu myös betonin kemiallisten sidosten rikkomiseen.

6.7 Palosuojamaalattun teräksen lämpötila ajan funktiona

Pääpiirteittäin palosuojamaalattun teräksen lämpötilan kehitys noudattaa samaa periaatetta kuin luvussa 6.5 esitetyt periaatteet. Tämän luvun laskentaperiaate perustuu teräsrakenneyhdistyksen laatimiin varmennettuihin käyttöselosteisiin eri palosuojamateriaaleille. Poikkeuksena palosuojamaalattun teräksen lämpötilan laskemiseksi tarvitaan edellisessä kappaleessa kuvattujen suureiden lisäksi seuraavat tekijät:

d' on palosuojamaalin muunnettu kalvonpaksuus. Paloluokan ja poikkileikkauksen mukainen laskentakaava esitetään teräsrakenneyhdistyksen tuotekohtaisissa varmennetuissa käyttöselosteissa.

$\frac{F_i'}{V}$ on teräsprofiilin muunnettu poikkileikkaustekijä. Paloluokan ja poikkileikkauksen mukainen laskentakaava esitetään teräsrakenneyhdistyksen tuotekohtaisissa varmennetuissa käyttöselosteissa.

λ_d' on käytetyn palosuojamaalin muunnettu lämmönjohtavuus. Tuotekohtaiset arvot esitetään taulukoituna lämpötilan funktiona teräsrakenneyhdistyksen tuotekohtaisissa varmennetuissa käyttöselosteissa.

Näiden ja kappaleessa 6.5 esitettyjen tekijöiden perusteella voidaan ratkaista palosuojamaalattun teräksen lämpötila, joka saadaan kaavasta:

$$\Delta\theta_t = \frac{\lambda_d'}{d' * c_a * \rho_a} * \frac{F_i'}{V} * (\theta_g - \theta_t) * \Delta t$$

Laskennan helpottamiseksi muutetaan kaikki ajasta ja lämpötilasta riippumattomat tekijät yhdeksi vakioksi.

Eräessä tapauksessa ja eräällä palosuojatuotteella vakio on muotoa:

$$z_p = \frac{1}{d \cdot \rho_a} \left(\frac{A_m}{V_m} * \left(1.432 - 5.614 * 10^{-3} * \frac{A_m}{V_m} \right) \right) \quad (78)$$

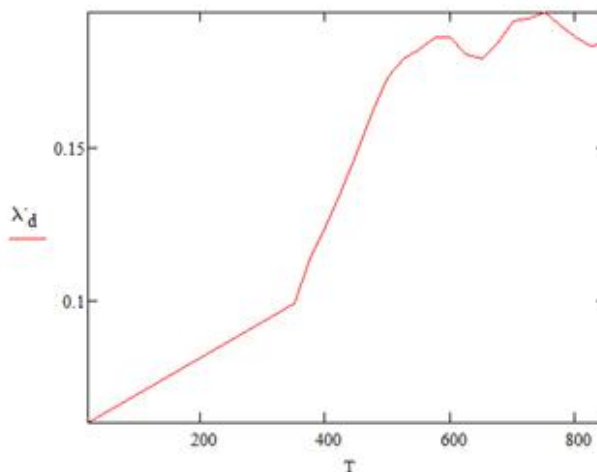
Tämän jälkeen, kuten edellä, jaetaan yhtälön molemmat puolet differentiaalilla ajasta, jolloin saadaan:

$$\frac{d\theta_t(t)}{dt} = z_p * \frac{\lambda_d}{c_a} * (\theta_g(t) - \theta_t(t)) \quad (79)$$

λ_d :n arvot ovat taulukoituna varmennetussa käyttöselosteessa. Arvot ovat riippuvaisia palosuojamateriaalin lämpötilasta. Ohjeistukseksi annetaan, että palosuojamateriaalin lämpötilana voidaan pitää teräksen sekä palotilan lämpötilojen aritmeettista keskiarvoa. Väliarvot taulukosta saadaan lineaarisesti interpoloimalla. Kuvassa 31 on esitetty erään materiaalin muunnettujen lämmönjohtavuuksien taulukko varmennetusta käyttöselosteesta.

Taulukko 4. Teräsnormikortin N:o 16/2004 mukaan määritetyt Nullifire S707 – 60 palosuojamaalin /7/ λ_d' -arvot suojattaessa WQ-palkkeja palonkestoalkaluokkiin R15 – R90. Ko. arvoja käytettäessä muunnettu kalvopaksuus d' lasketaan kaavasta (7) ja muunnettu poikkileikkaustekijä $(Ap/V)'$ kaavasta (8). Väliarvot interpoloidaan.

Palosuojamaalin keskimääräinen lämpötila [°C]	Palosuojamaalin muunnettu lämmönjohtavuus λ_d' [W/m°C]
20	0,0318
350	0,0318
375	0,0292
400	0,0256
425	0,0203
450	0,0144
475	0,0101
500	0,00826
525	0,00773
550	0,00769
575	0,00794
600	0,00830
625	0,00850
650	0,00870
675	0,00890
700	0,00889
725	0,00900
750	0,00882
775	0,00861
800	0,00794
825	0,00724
850	0,00659
875	0,00576
900	0,00473



Kuva 31. Varmennetun käyttöselosteen mukaiset muunnetut lämmönjohtavuudet [9.]

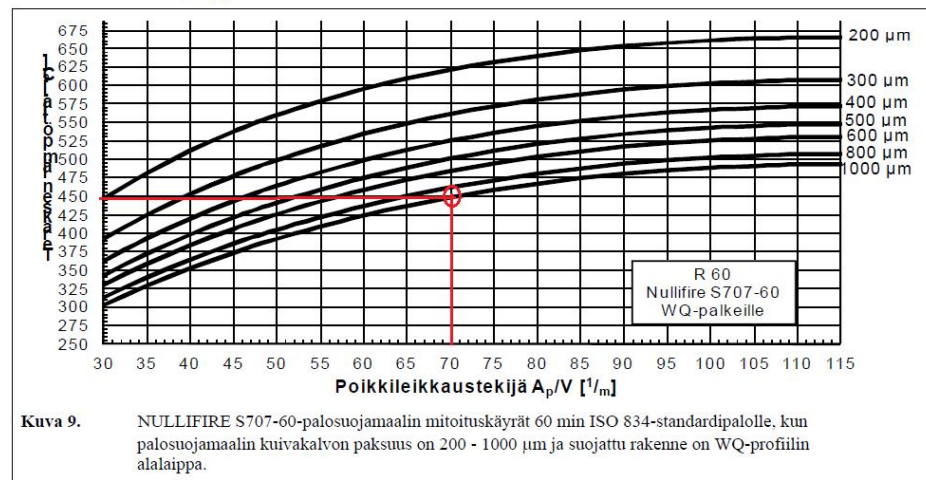
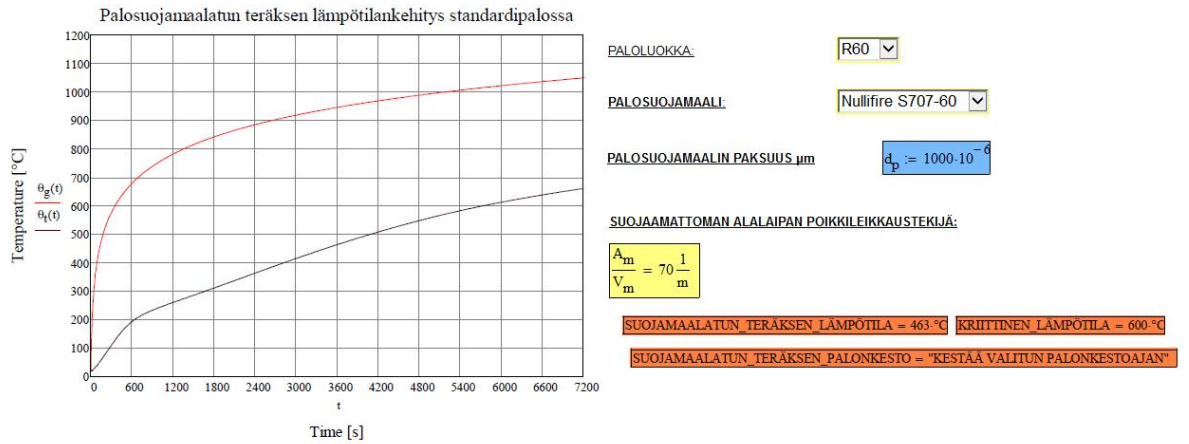
Palosuojatun teräspoikkileikkauksen lämpötilan laskeminen alkaa käydä edellä kuvattujen vaatimuksien puitteissa monimutkaisemmaksi ja monimutkaisemmaksi, jonka seurauksena myös laskentaohjelmaan kirjoitettavien kaavojen pituus kasvaa. Kuvassa 32 on esitetty pieni osa lausekkeesta, johon on sisällytetty ominaislämpökapasiteetin lämpötilariippuvuus sekä muunnetun lämmönjohtavuuden lineaarinen interpolointi. Kuvassa 33 esitetään laskentapohjan mukainen tulos palosuojamaalatulle teräspoikkileikkaukselle verrattuna Teräsrakenneyhdistyksen varmennetun käyttöselostuksen vastaavaan arvoon.

$$\frac{d}{dt}\theta_t(t) = \begin{cases} z_p \left[\frac{a_1}{\left(425 + 0.773 \cdot \theta_t(t) - 0.00169 \cdot \theta_t(t)^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_t(t)^3\right)} \right] \cdot \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right) - \theta_t(t)\right) & \text{if } \frac{\theta_t(t) + \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)\right)}{2} \leq 350 \\ z_p \left[\frac{\frac{1}{2} \left[\theta_t(t) + \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)\right) \right] - 350 \left[\frac{a_3 - a_2}{25} \right] + a_2}{\left(425 + 0.773 \cdot \theta_t(t) - 0.00169 \cdot \theta_t(t)^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_t(t)^3\right)} \right] \cdot \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right) - \theta_t(t)\right) & \text{if } 350 \leq \frac{\theta_t(t) + \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)\right)}{2} \leq 375 \\ z_p \left[\frac{\frac{1}{2} \left[\theta_t(t) + \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)\right) \right] - 375 \left[\frac{a_4 - a_3}{25} \right] + a_3}{\left(425 + 0.773 \cdot \theta_t(t) - 0.00169 \cdot \theta_t(t)^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_t(t)^3\right)} \right] \cdot \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right) - \theta_t(t)\right) & \text{if } 375 \leq \frac{\theta_t(t) + \left(20 + 345 \cdot \log\left(8 \cdot \frac{t}{60} + 1\right)\right)}{2} \leq 400 \end{cases}$$

Kuva 32. Palosuojamaalatu teräksen lämpötilan laskentakaava

Kuten kuvasta 33 huomataan, valitulle 60 minuutin palonkestoajalle, 1 000 mikrometrin palosuojamaalin kuivakalvopaksuudella sekä WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijän arvolla 70 saadaan teräksen lämpötilaksi 463 C°. Teräsrakenneyhdistyksen laatiman varmennetun käyttöselosteen mukaan vastaavan tilanteen teräksen lämpötila olisi 450 C°.

Ero on melko pieni, mutta se on yksinkertaisesti selitettävissä ominaislämpökapasiteetin lämpötilaverrannollisuudella. Varmennetun käyttöselosteen mukaan ominaislämpökapasiteetille voidaan käyttää vakioarvoa $600 \frac{J}{kg \cdot C}$. Todellisuudessa teräksen ominaislämpökapasiteetti saavuttaa edellä mainitun arvon vasta, kun teräksen lämpötila on 388 C°. Tämä tarkoittaa sitä, että niin kauan kun teräksen lämpötila on alle 388 C°, tarvitaan vähemmän lämpöenergiaa, jotta yhden painoyksikön suuruinen määrä terästä nousisi lämpötilaltaan yksikön suuruiseen määrään. Tämä puolestaan kertoo, että mitä parempi poikkileikkauksen palonsuojaus on, sitä suurempi ero teräksen laskennallisten lämpötilojen välille kahden eri menetelmän mukaan laskettaessa muodostuu. Erinomaisen huomionarvoista seikasta tekee se, että mikäli teräksen ominaislämpökapasiteetin oletetaan olevan vakio $600 \frac{J}{kg \cdot C}$, antaa menetelmä tarkkaan ominaislämpökapasiteettiin verrattuna alhaisempia teräslämpötiloja, eli tulokset ovat epävarmalla puolella. [9.]



Kuva 33. Vertailu teräksen lämpötiloissa laskentapohjan ja varmennetun käyttöselosteen välillä

6.8 Palosuojaruiskutetun teräksen lämpötila ajan funktiona

Palosuojaruiskutetun teräsprofiilin lämpötila voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta\theta_{t,r} = \frac{\lambda_d}{d_r * c_a \rho_a} * \frac{F_i}{V} * \frac{1}{1 + \frac{\mu}{3}} * (\theta_g - \theta_t) * \Delta t - \left(e^{\frac{\mu}{10}} - 1 \right) * \Delta\theta_g$$

missä:

$$\mu = \frac{c_r * \rho_r}{c_a * \rho_a} * d * \frac{F_i}{V}$$

missä:

c_r on palosuojauskuutteen ominaislämpökapasiteetti. Tuotekohtaiset arvot esitetään teräsrakenneyhdistyksen tuotekohtaisissa varmennetuissa käyttöselosteissa.

ρ_r on palosuojauskuutteen tiheys. Tuotekohtaiset arvot esitetään teräsrakenneyhdistyksen tuotekohtaisissa varmennetuissa käyttöselosteissa.

Muut kaavassa esitetyt suureet vastaavat luvussa 6.7 esitettyjä suureita. Suureiden merkitykset ja arvot esitetään teräsrakenneyhdistyksen varmennetuissa käyttöselosteissa.

Jaetaan yhtälön molemmat puolet differentiaalilla ajasta, jolloin saadaan:

$$\frac{d\theta_{t,r}(t)}{dt} = \frac{\lambda_d}{d_r * c_a * \rho_a} * \frac{F_i}{V} * \frac{1}{1 + \frac{\mu}{3}} * (\theta_g(t) - \theta_t(t)) - \left(e^{\frac{\mu}{10}} - 1 \right) * \frac{d\theta_g(t)}{dt} \quad (80)$$

Kyseessä on jälleen kerran separoitumaton differentiaaliyhtälö, joka täytyy ratkaista numeerisesti. Lisäksi ratkaisun selvittämiseksi tarvitaan palotilan lämpötilan derivaatta. Palotilan lämpötilan kaava on muotoa:

$$\theta_g(t) = 20 + 345 * \log\left(\frac{8*t}{60} + 1\right)$$

Derivaatan ratkaisemiseksi muutetaan ensin kymmenkantainen logaritmi luonnolliseksi logaritmiksi. Tämä voidaan suorittaa kaavalla:

$$\log_{10}(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(10)}$$

Kun kuvattu toimenpide suoritetaan, saadaan:

$$\theta_g(t) = 20 + 345 * \frac{\ln\left(\frac{8*t}{60} + 1\right)}{\ln(10)}$$

Luonnollisen logaritmin derivaattafunktio on helppo laskea, sillä se noudattaa seuraavaa derivointikaavaa:

$$D\ln(f(x)) = \frac{f'(x)}{f(x)}$$

Soveltamalla kaavaa, saadaan:

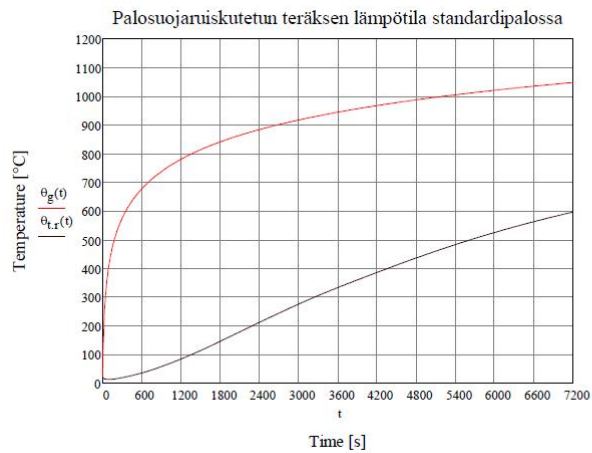
$$\frac{d\theta_g(t)}{dt} = \frac{46}{\ln(10) * \left(\frac{2+t}{15} + 1\right)} \quad (81)$$

Sijoittamalla standardipalokäyrän derivaatta teräksen lämpötilan yhtälöön voidaan ratkaista palosuoja-eristettyä teräksen lämpötila ajan funktiona. [10.]

6.9 Johtopäätökset teräksen lämpötilasta ja palosuojauksesta

Kuvassa 34 vertaillaan WQ-palkkilaskurin ja varmennetun käyttöselosteen mukaisia teräksen lämpötiloja. WQ-palkkilaskurin mukaan vaaditun palonkestoajan ollessa 60 minuuttia, mineraaliruiskute-eristeen paksuuden ollessa 25 mm ja WQ-palkin alalaipan poikkileikkaustekijän ollessa $100 \frac{1}{m}$ saadaan teräksen lämpötilaksi $333 \text{ } ^\circ\text{C}$. Varmennetun käyttöselosteen mukainen teräksen lämpötila vastaavilla arvoilla on $300 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tuloksien välinen ero on selitettävissä ominaislämpökapasiteettien välisellä eroavaisuudella. Kuvassa 35 on esitetty tilanne, jossa WQ-palkkilaskurin laskenta on muutettu siten, että teräksen ominaislämpökapasiteetin arvo ei ole lämpötilasidonnainen; arvo on korvattu vakioarvolla $600 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{ } ^\circ\text{C}}$. Huomataan, että tämän toimenpiteen seurauksena WQ-palkkilaskurin ja varmennetun käyttöselosteen antamat tulokset eivät eroa toisistaan. Tarkastelemalla varmennetun käyttöselosteen kuvaajaa huomataan, että lämpötila ei ala nolasta asteesta ja että ohuemmillä suojamateriaalin paksuuksilla pienen poikkileikkaustekijän omaavan profiilin lämpötila on kuvaajan mukaan vakio. Tämä antaa kuvaajasta luettaessa hitaammin kuumeneville poikkileikkauksille todellisuutta korkeampia arvoja. Tämä on siis varman puolella oleva toimenpide.

Piirtämällä molemmilla ominaislämpökapasiteetin arvoilla lasketut teräslämpötilat samaan kuvaajaan saadaan parempi käsitys yksinkertaistuksen vaikutuksesta teräksen lämpötilaan. Vaihtelemalla alalaipan poikkileikkaustekijän ja palosuoja-aineen paksuutta, voidaan kartoittaa vaikutus eri tilanteissa paremmin. Muutamien eri variaatioiden tulokset on esitetty kuvissa 36–39. Kuvaajissa punaisella piirretty ylempi käyrä kuvaa tarkan teräslämpötilan arvoa ja mustalla piirretty alempi käyrä kuvaa yksinkertaistettua käyrää.



PALOLUOKKA:

R60

PALOSUOJARUISKUTE:

PROMASPRAY F250

PALOSUOJARUISKUTTEEN PAKSUUS m

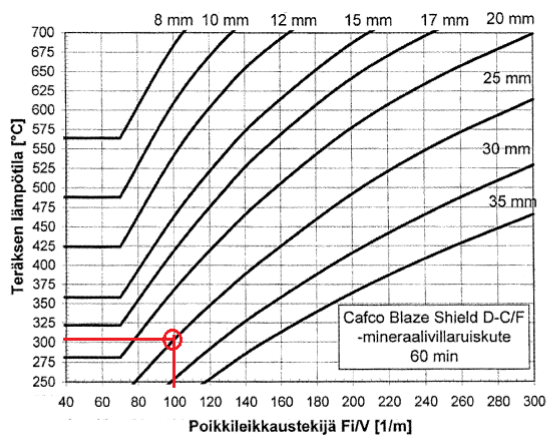
 $d_t = 0.025$

SUOJAAMATTOMAN ALALAIIPAN POIKKILEIKKAUSTEKIJÄ:

$$\frac{F_i}{V_i} = 100$$

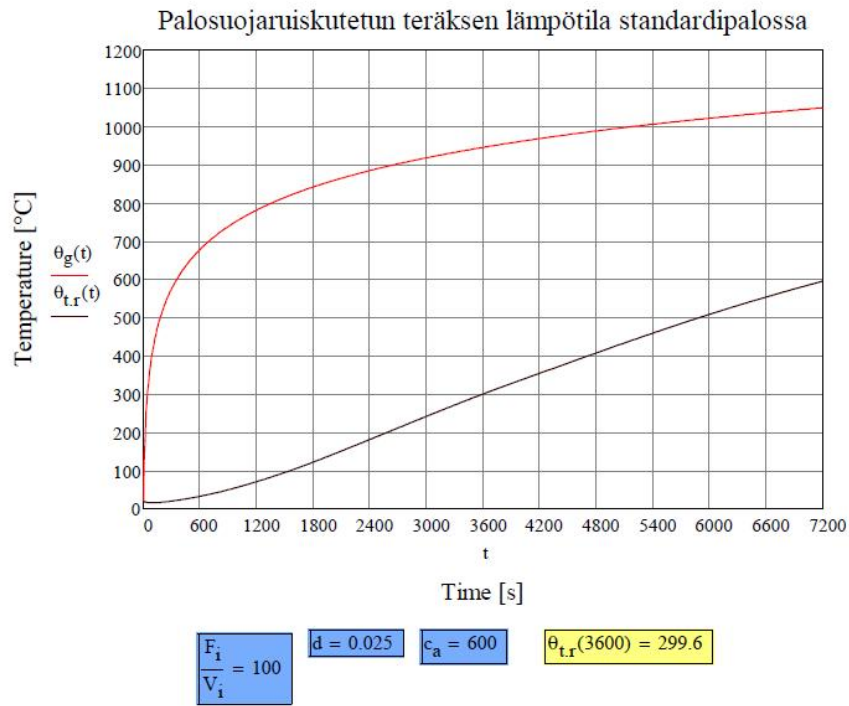
SUOJARUISKUTETUN TERÄKSEN LÄMPÖTILA = 333 °C KRIITTINEN LÄMPÖTILA = 600 °C

SUOJARUISKUTETUN TERÄKSEN PALONKESTO = "KESTÄÄ VALITUN PALONKESTOAJAN"

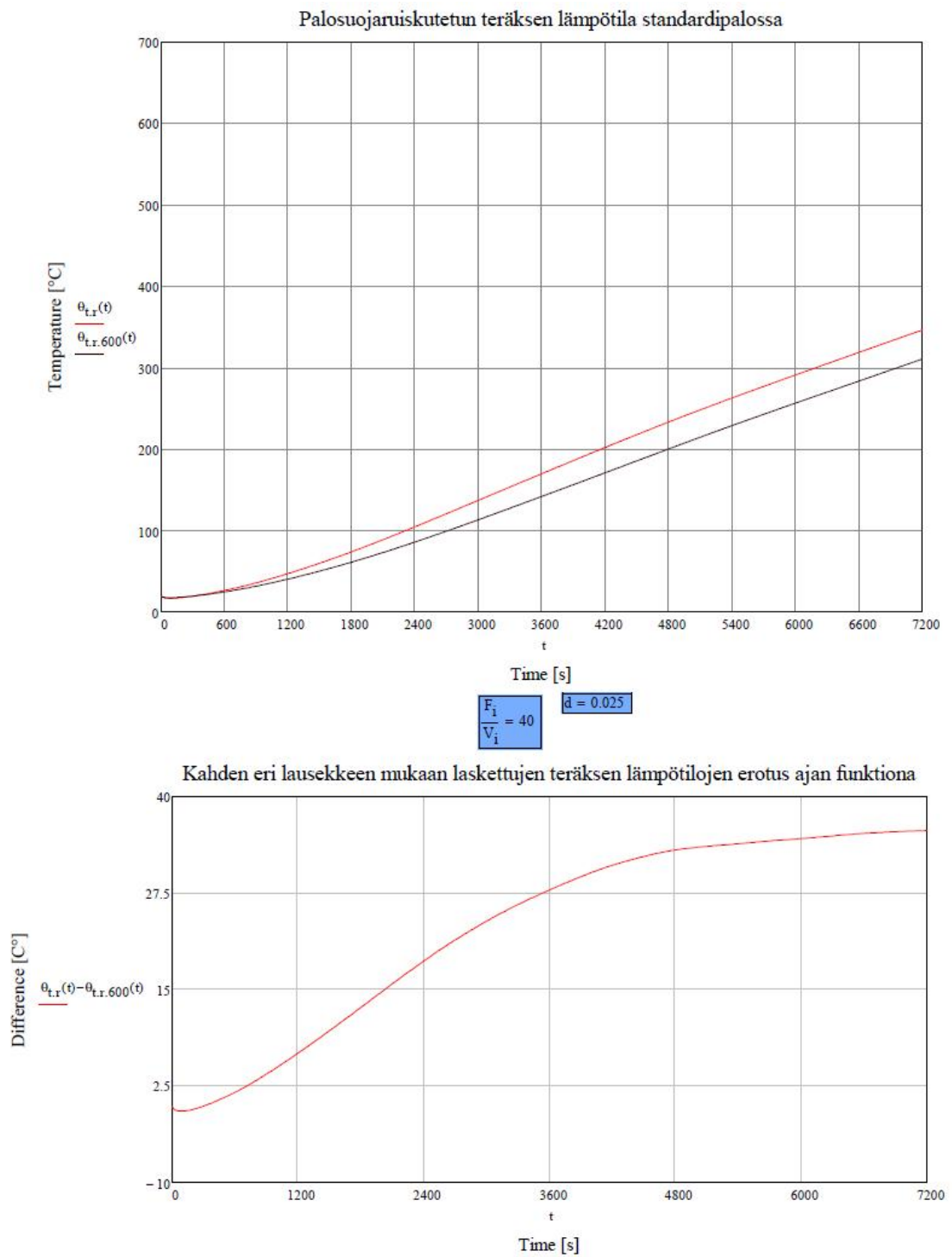


Kuva 2. Promaspray F250-mineraalivillaruiskutteen mitoituskäyrät 60 min standardipalolle, kun eristepaksuus on 8-35 mm.

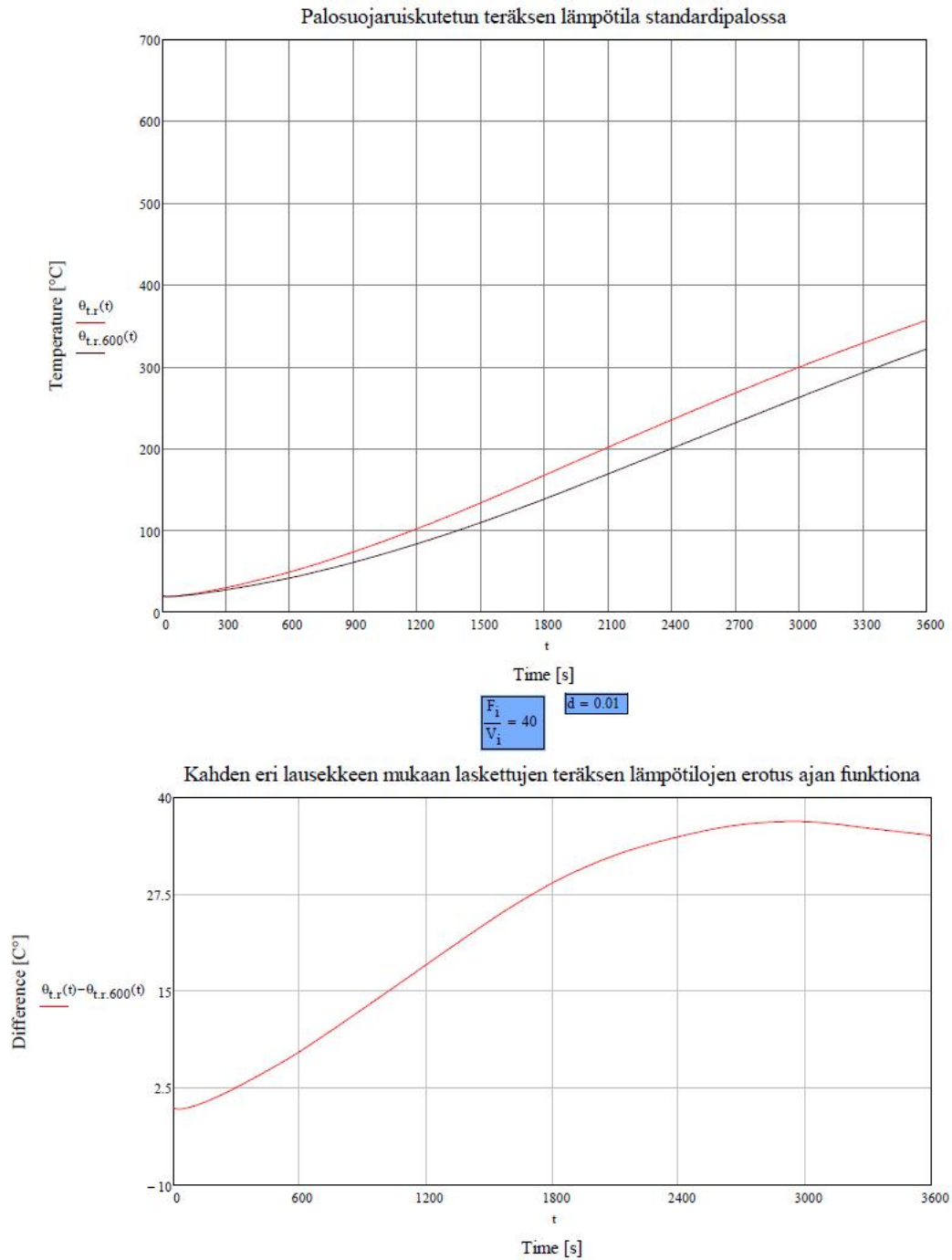
Kuva 34. Vertailu teräksen lämpötiloissa laskentapohjan ja varmennetun käyttöselosteen välillä



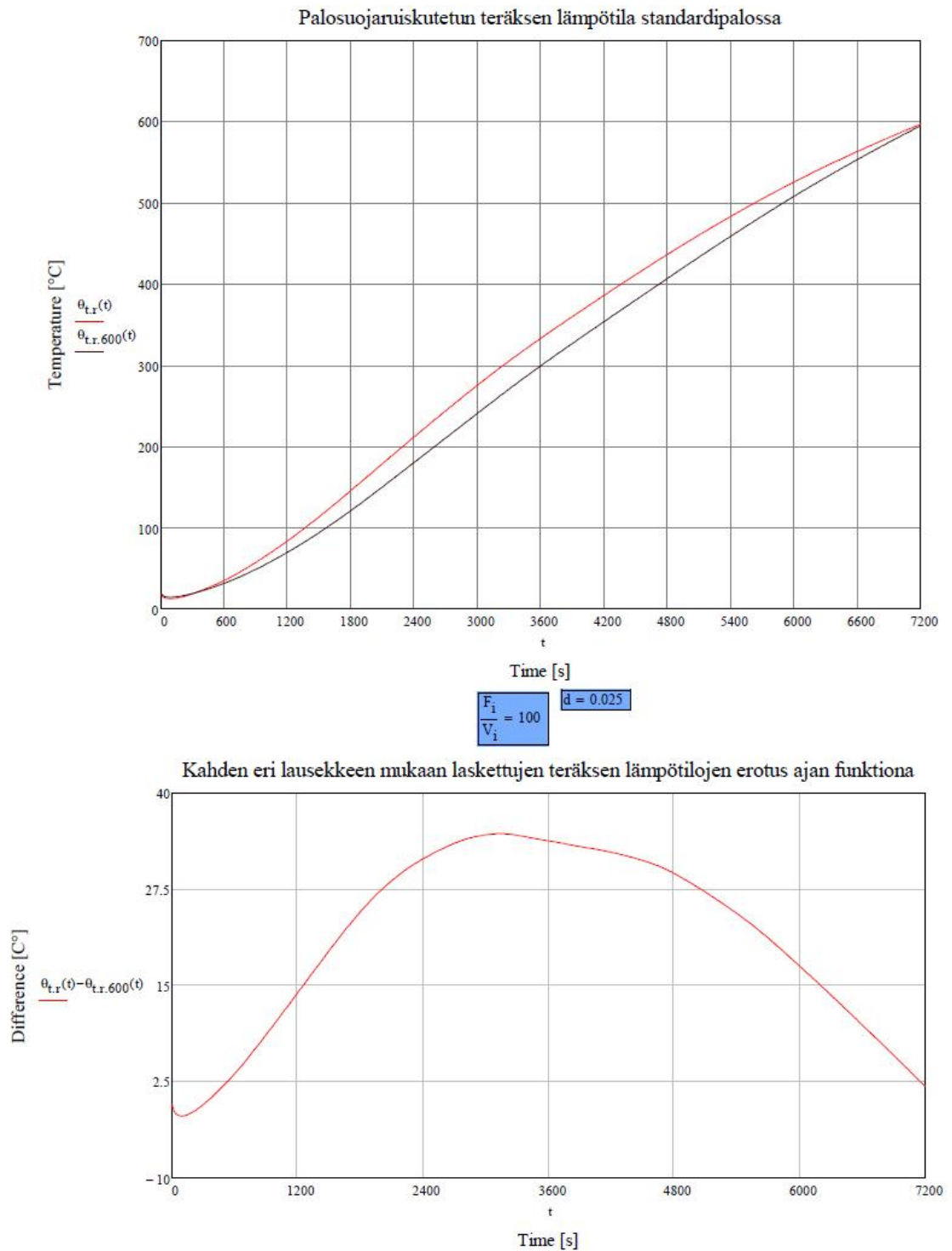
Kuva 35. Teräksen lämpötila ominaislämpökapasiteetin vakioarvolla on täysin sama verrattuna käyttöselosteen kuvaajasta luettavaan arvoon



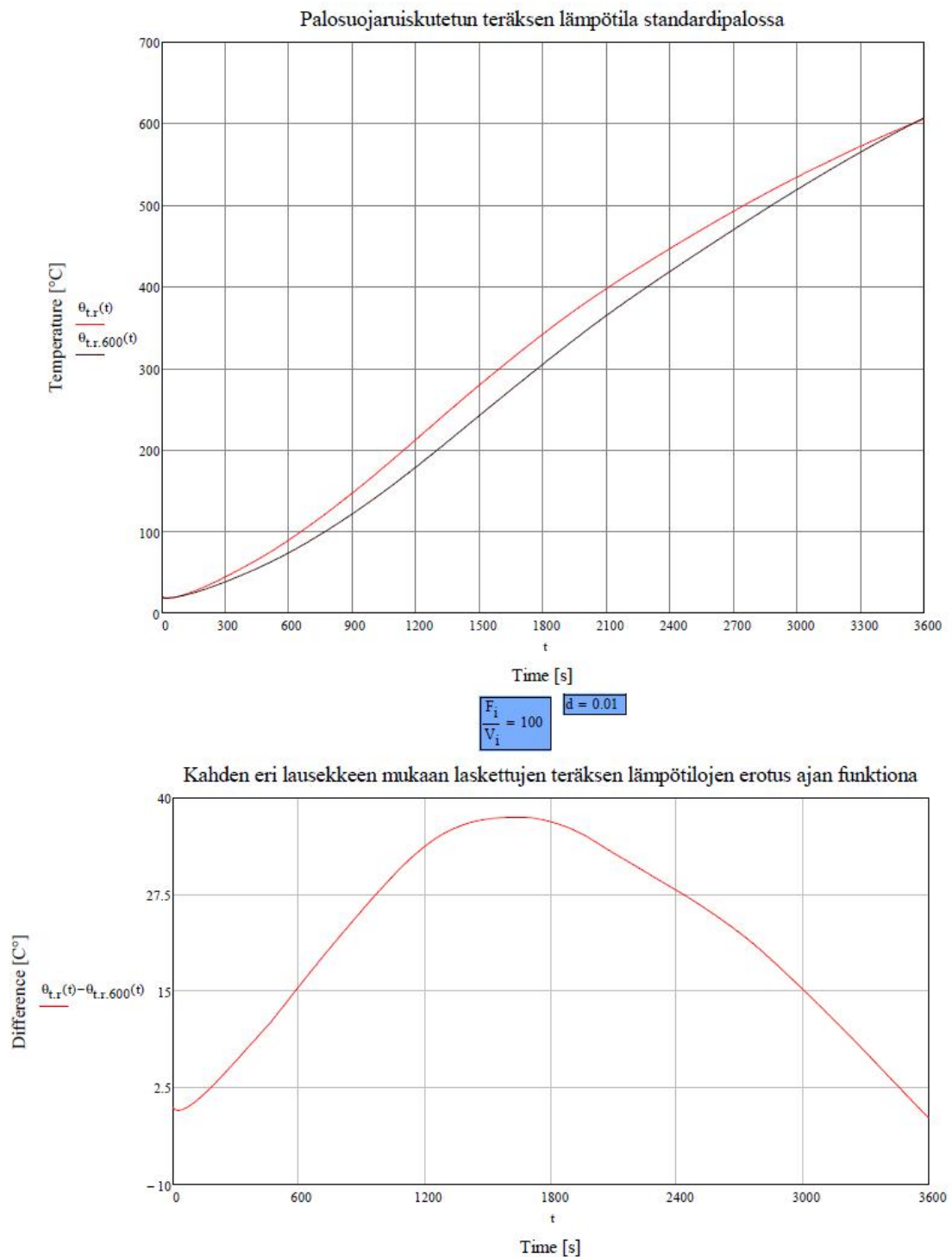
Kuva 36. Kahden eri lausekkeen mukaan laskettujen teräslämpötilojen erotus ajan funktiona



Kuva 37. Kahden eri lausekkeen mukaan laskettujen teräslämpötilojen erotus ajan funktiona



Kuva 38. Kahden eri lausekkeen mukaan laskettujen teräslämpötilojen erotus ajan funktiona



Kuva 39. Kahden eri lausekkeen mukaan laskettujen teräslämpötilojen erotus ajan funktiona

Tutkimalla esitettyä aineistoa voidaan huomata, että kartoitetuissa tilanteissa yksinkertaistuksen vaikutus on noin $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Huomionarvoista tuloksessa on se, että kaikissa las-

ketuissa tapauksissa yksinkertaistus tuottaa matalampia teräsrakenteen lämpötiloja verrattuna tarkempaan laskentamenetelmään.

7 WQ-ulokepalkkilaskurin käyttö

WQ-ulokepalkkilaskurin kaikki laskennan vaiheet perustuvat tässä insinööriyössä kuvattuihin laskentaa käsitteleviin ohjeisiin.

7.1 Lähtötiedot

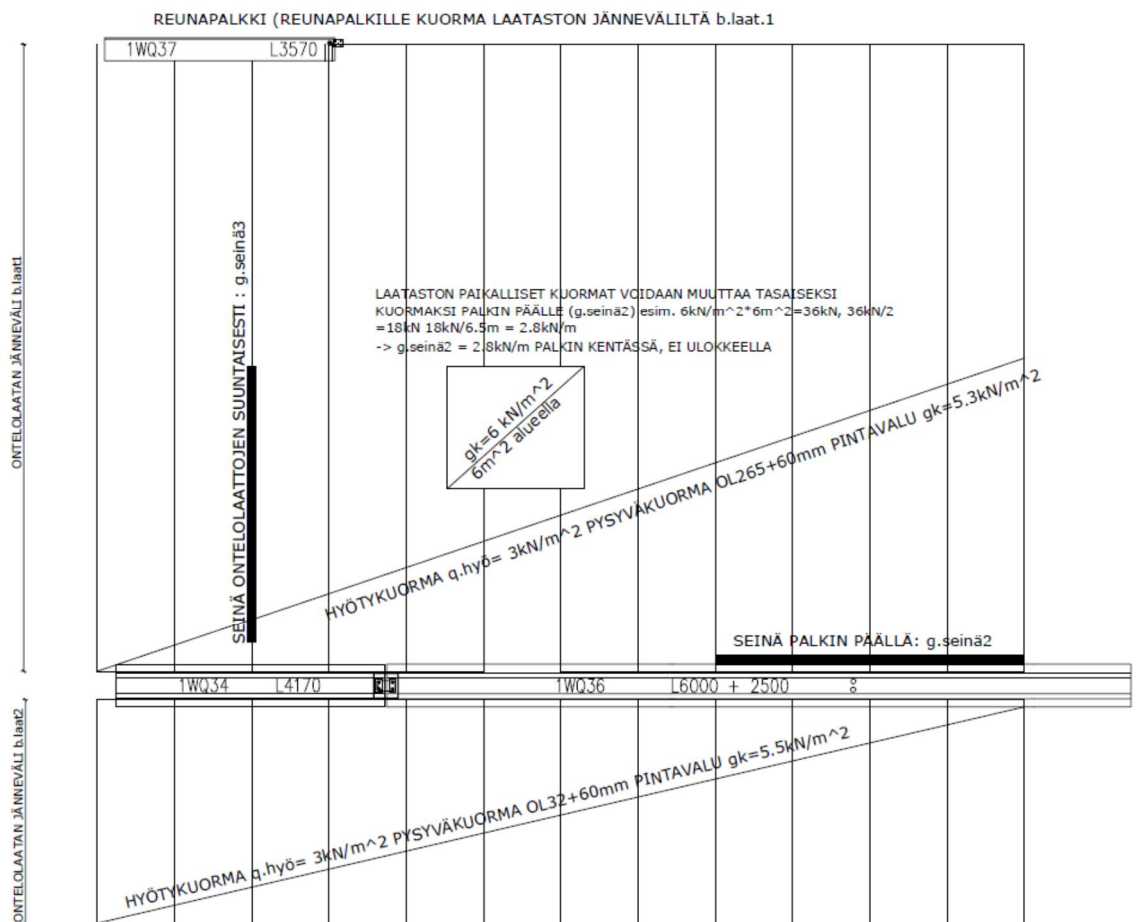
WQ-ulokepalkkilaskurin ensimmäisille sivuille syötetään sinisellä pohjalla merkittyihin kenttiin vaadittavat lähtötiedot. Ohjelmassa oletetaan laataston muodostuvan ontelolaatoista.

- 1) Ontelolaattavalmistajan ilmoittama ontelolaatan paino valitulle laatalle merkitään sille varattuun kenttään. Lisäksi ohjelma vaatii syötettäväksi pintabetonin painon (yleensä $25 \frac{kN}{m^3}$), pintabetonin paksuuden sekä hyötykuorman.
- 2) Palkki muodostuu ulokkeesta sekä kentästä, joiden pituudet syötetään niille varattuihin kenttiin.
- 3) Ontelolaataston jänneväliä tarkoitetaan WQ-palkin vasemmalla ja oikealla puolella olevien ontelolaattojen pituutta. Kenttien ei tarvitse olla yhtä suuret. Mikäli mitoitetaan reunapalkkia, tulee laataston pituus syöttää kenttään ”jänneväli 1”.
- 4) WQ-ulokepalkkilaskuri olettaa palkin ulokkeen päässä olevan ulkoseinä, jonka neliöpaino syötetään sille varattuun kenttään. Lisäksi ulokkeen pään seinän korkeus syötetään sille varattuun kenttään.
- 5) Mikäli WQ-palkin päällä on tasaista kuormaa, joka muodostuu esimerkiksi WQ-palkin suuntaisen seinän painosta, merkitään kyseinen kuorma sille varattuun kenttään. Käyttäjä voi erikseen määritellä vaikuttaako kyseinen kuorma pelkästään kentässä, ulokkeella vai koko palkin pituudella. Jos kyseinen kuorma ei vaikuta aivan keskellä WQ-palkin ylälaippaa, voi käyttäjä arvioida kuorman

vääntöä lisäävän vaikutuksen ja lisätä vääntöä aiheuttavan lisäkuorman tälle varattuun kenttään.

- 6) Mikäli ontelolaataston päällä on laattojen kanssa samansuuntaisia seiniä, syötetään seinän metrikuorma sille varattuun kenttään ja seinän pituus omaansa. Ontelolaattojen suuntainen seinä voi sijaita ainoastaan kentän alueella. Kentän suurimman mahdollisen momentin määrittämiseen liittyvistä syistä käyttäjän täytyy ilmoittaa seinän sijainti palkin ulokkeettomasta päästä mitattuna.

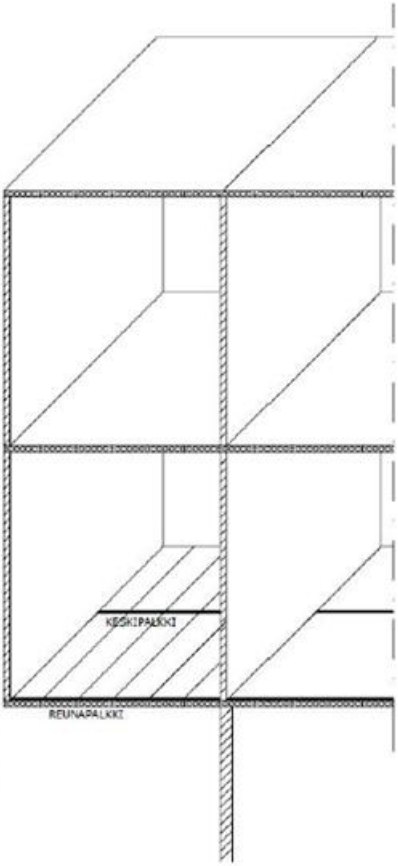
Kuvassa 40 on esitetty tasokuva laatastosta, jonka avulla kuormituksia on pyritty havainnollistamaan.



Kuva 40. WQ-palkin kuormitusta havainnollistava tasokuva

- 7) Lähtötietoihin syötetään mitoitettavan palkin yläpuolella sijaitsevien identtisten kenttien lukumäärä. Tietoa tarvitaan kriittisen pisteen normaalivoiman määrittämiseen.
- 8) Käyttäjän täytyy määritellä palkin sijainti, millä tarkoitetaan sitä, onko palkki reunapalkki vai keskipalkki. Tieto syötetään kenttään kirjoittamalla sille varattuun kenttään joko luku yksi tai luku kaksi, riippuen siitä kumpi palkki on kysymyksessä.
- 9) Mitoitettavalle palkille valitaan pudotusvalikosta paloluokka, johon palkki halutaan mitoittaa. Lisäksi valitaan seuraamusluokka sekä palotilanteen muuttuvien kuormien yhdistelykerroin. Kuvassa 41 on esitetty edellä numeroitujen kohtien oikeat paikat WQ-palkkilaskurin lähtötietosivulla.

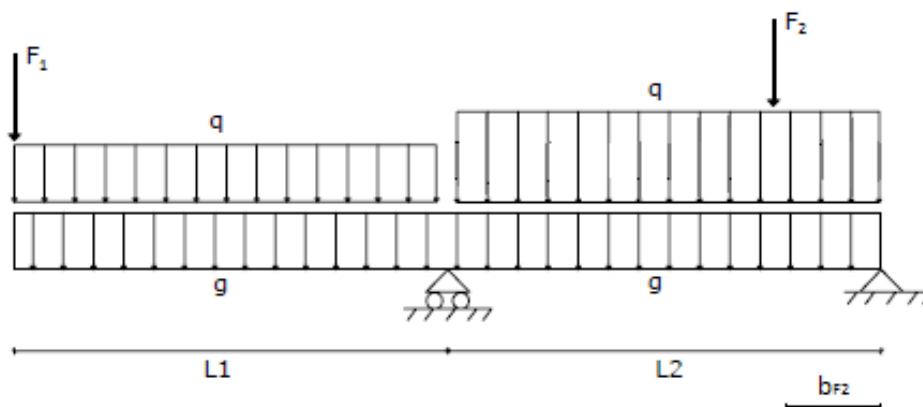
ONTELOLAATAN PAINO:	$g_{ont} := 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	1	
PINTABETONIN PAINO:	$g_{bet} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	1	
PINTABETONIN PAKSUUS:	$h_{bet} := 100\text{mm}$	1	
HYÖTYKUORMA:	$q_{hyö} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	1	
ULOKKEEN PITUUS:	$L_1 := 3\text{m}$	2	
KENTÄN PITUUS:	$L_2 := 6\text{m}$	2	
ONTELOLAATAN JÄNNEVÄI 1: (REUNA)	$b_{laat1} := 6\text{m}$	3	
ONTELOLAATAN JÄNNEVÄI 2: (KESKI)	$b_{laat2} := 6\text{m}$	3	
SEINÄN PAINO ULOKKEEN PÄÄSSÄ:	$g_{seinä} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	4	
SEINÄN KORKEUS:	$h_{seinä} := 3\text{m}$	4	
SEINÄN PAINO WQ PALKIN PÄÄLLÄ:	$g_{seinä2} := 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	5	
ONTELOLAATTOJEN SUUNTAINEN SEINÄ:	$g_{seinä3} := 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	6	
SEINÄN ETÄISYYS ULOKKEETTOMASTA PÄÄSTÄ PALKKIA:	$b_{F,2} := 3\text{m}$	6	
ONTELOLAATTOJEN SUUNTAISEN SEINÄN PITUUS:	$L_{seinä3} := 5\text{m}$	6	$kuorma_{vääntö} := 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ 5
KERROSTEN LUKUMÄÄRÄ:	$n_{krs} := 3$	7	
SEINÄ PALKIN PÄÄLLÄ:	$s_{einä} := 1$	5	$S_{einä}$: Ei seinää = 0 Seinä palkin päällä = 1
SEINÄ KENTÄSSÄ/ULOKKEELLA/ KOKO PALKILLA:	$s_{einä2} := 3$	5	Jos seinä pelkän ulokkeen päällä, $S_{einä2} = 1$ Jos seinä pelkän kentän päällä, $S_{einä2} = 2$ Jos seinä koko palkin päällä, $S_{einä2} = 3$
PALKIN SIJAINTI:	$P_{alkki} := 3$	8	REUNAPALKKI=1, KESKIPALKKI=2
PALOLUOKKA:	R60	$K_{Fi} := 1.0$	$\psi_{2,1} := 0.3$ 9



Laske tähän laataston ja palkin päällä mahdollisesti epäkeskisesti sijaitsevien seinien vääntöä aiheuttava kuorma. Huom! Pienempi kenttä tasapainoittaa suurempaa, huomio siis tähän vain vääntöä lisäävät kuormat

Kuva 41. Ohjeistus lähtötietojen syöttämistä varten

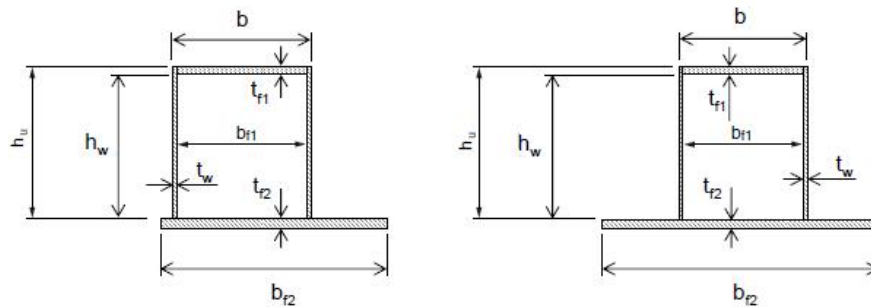
Kuvassa 42 on esitetty palkin voimasuureiden laskemisen kannalta olennainen palkin staattinen malli.



Kuva 42. WQ-palkkilaskurin mukainen staattinen rakennemalli voimasuureiden selvittämiseksi

WQ-palkin mitat voidaan syöttää niille varattuihin kenttiin. WQ-ulokepalkkilaskurin yhteydessä tukipinnan leveydellä tarkoitetaan sitä pintaa, jonka ontelolaattojen voidaan katsoa tukeutuvan WQ-palkin alalaippaa vasten. Samassa yhteydessä nousee esille lähtötietona annettava saumavalun paksuus, millä tarkoitetaan käytännössä WQ-palkin uuman ja ontelolaatan pään väliin jäävää etäisyyttä.

On erityisen huomionarvoista, että WQ-palkin alalaipan vapaa mitta uuman reunasta on vähintään sen mittainen, että valitun ontelolaatan tukipinnan ja saumavalun minimilevydet täyttyvät. Näillä arvoilla on myös vaikutusta poikittaisen taivutuksen suuruuteen. Kuvassa 43 on esitetty WQ-palkin profiilia koskevien lähtötietojen täyttämiseen varattu sivu.

WQ-PALKIN MITAT:UUMAN KORKEUS:

$h_u := 320\text{mm}$

UUMAN PAKSUUS:

$t_w := 5\text{mm}$

YLÄLAIPAN LEVEYS:

$b_{f1} := 344\text{mm}$

YLÄLAIPAN PAKSUUS:

$t_{f1} := 15\text{mm}$

ALALAIPAN PAKSUUS:

$t_{f2} := 15\text{mm}$

ALALAIPAN LEVEYS:

$b_{f2} := 660\text{mm}$

SAUMAVÄLUN PAKSUUS:

$b_j := 50\text{mm}$

TUKIPINNAN LEVEYS:

$d := 110\text{mm}$

TERÄKSEN LUJUUSLUOKKA:

$f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

UUMAN JÄYKISTEIDEN VÄLINEN SUURIN ETÄISYYS:

$a := L_1$

(L.1, jos vain päätylevyt jäykisteinä)

REUNAPALKIN KUORMITTAMATTOMAN LAIPAN LEVEYS:

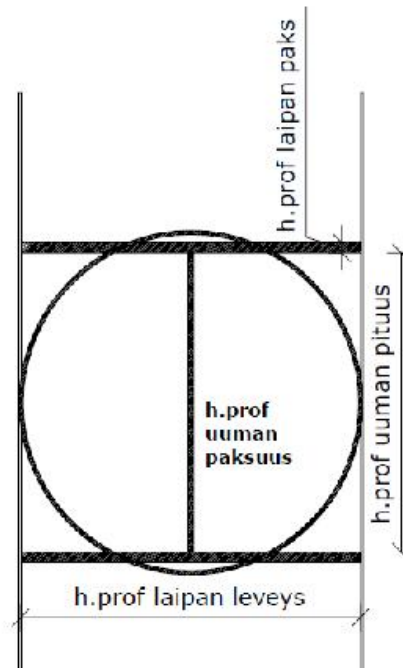
$r_1 := 0\text{mm}$

(0mm, jos keskipalkki)

Kuva 43. WQ- palkin profiilin valinta sekä muut profiiliin liittyvät lähtötiedot

Seuraavaksi käyttäjän tulee syöttää ulokkeen viereiseen tukipisteeseen liittyvät lähtötiedot. Käytännössä näihin tietoihin kuuluu sen H-profiilin uuman pituus, mitä halutaan käytettävän WQ-palkin sisäisenä profiilina kohdan 4.7 mukaisen kriittisen pisteen puristuksen vastaanottamiseksi. Sivulla valitaan myös, halutaanko kriittisen pisteen sisäisen profiilin betonin lujuutta hyödyntää puristuksen vastaanottamiseen. Mikäli mitoitettavan palkin yläpuoliset rakenteet ovat epäsäännöllisiä tai kuormat poikkeavat merkittävästi mitoitettavan kerroksen kuormista, voi käyttäjä laskea itse pilarin kerroskohtaisesti siirtämät normaalivoimat ja syöttää lasketun arvon sille varattuun kenttään. Lisäksi käyttäjän täytyy ilmoittaa laskupohjalle, halutaanko käyttää laskupohjan normaalivoimaa vai

käyttäjän itse määrittelemää arvoa. Kuvassa 44 on kuvattu WQ-palkin sisäisen profiilin lähtötiedoille varattu sivu.



H-PROFIILIN UUMAN PITUUS:

$$h_{h_prof} := 500\text{mm}$$

H-PROFIILIN UUMAN PAKSUUS:

$$t_{w,h_prof} := 5\text{mm}$$

H-PROFIILIN LAIPAN PAKSUUS:

$$t_{f,h_prof} := 10\text{mm}$$

BETONIN TEHOLLISUUDESTA HUOMIOIDAAN:

$$P_{urist\%} := 10\%$$

BETONIN LUJUUSLUOKKA:

C40/50 ▾

H-PROFIILIN LAIPAN LEVEYS:

$$b_{h_prof} := b_{f1} - 4\text{mm}$$

H-PROFIILIN KORKEUS PILARIN SUUNNASSA:

$$h_{prof.kork} := h - t_{f1} - t_{f2} - 2\text{mm} = 303\text{mm}$$

$$N_{Ed.oma} := 3500\text{kN}$$

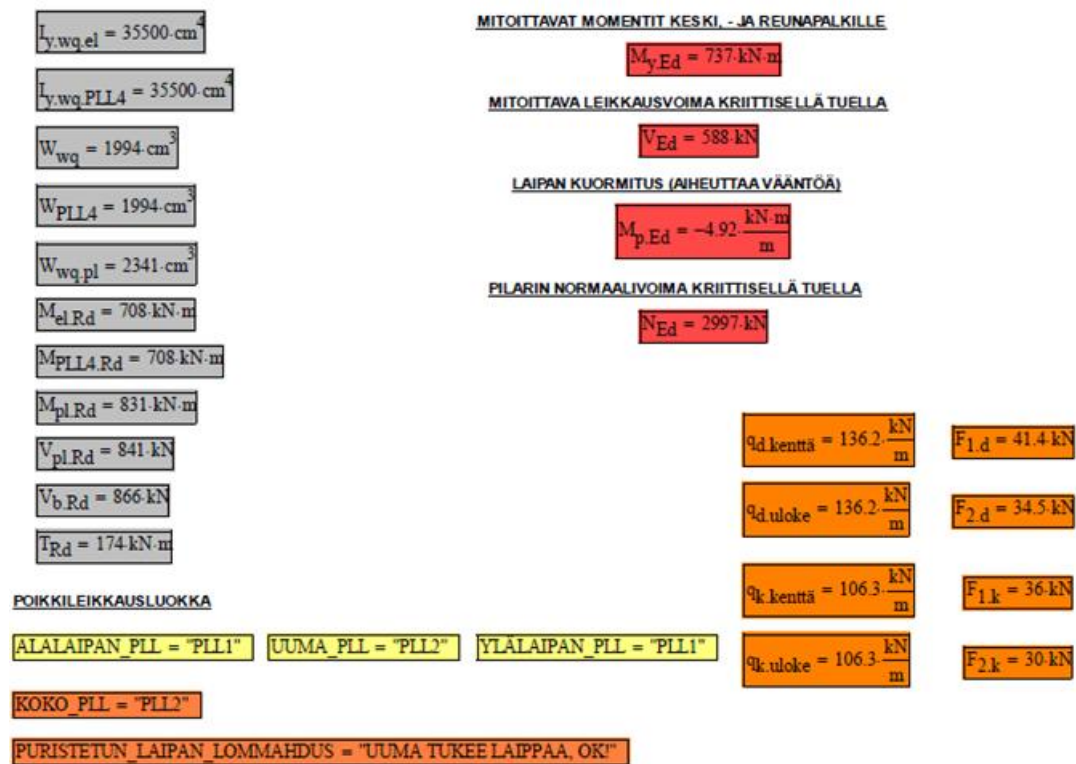
LASKENTAPOHJAN ARVO ▾

Kuva 44. WQ-palkin sisäisen H-profiilin mitat ja kriittinen normaalivoima

Palomitoituksen osalta tarvittavat lähtötiedot ovat käytetty palosuojamateriaali ja käytetty palosuojamateriaalin kuivakalvopaksuus. Muut palomitoituksen lähtöarvot on syötetty ensimmäiselle lähtötietosivulle.

7.2 Laskentapohjan tulokset

Kun kaikki tarvittavat lähtötiedot on syötetty, laskupohja kerää laskennan tulokset omalle tulossivulle. Esimerkki laskentapohjan raportista on esitetty liitteessä 6. Oheinen kuva 45 kuvaa tuloksista sen osan, missä esitetään mitoittavat voimasuureet.



Kuva 45. Mitoittavat voimasuureet sekä WQ-palkin kestävyysarvot

7.2.1 Tuloksien tulkitseminen

Kun laskenta on suoritettu, tulossivun ensimmäiseen osioon ilmestyy laskennan kannalta tärkeitä tunnuslukuja. Laskentapohjan käyttäjän tulee ensimmäisenä tutustua tähän sivuun ja varmistaa, että lasketut arvot vaikuttavat suuruusluokaltaan oikeilta. Varsinkin mitoittavien voimasuureiden osalta tulee varmistua, että ilmoitetut kuormituk-

set vastaavat omaa käsitystä tilanteesta. Poikkileikkauksen osalta kannattaa kiinnittää huomiota poikkileikkausluokkaan ja kimmoisen tilan jäyhyysmomenttiin. Jos nämä arvot ovat suunnittelijan alustavan arvion mukaisessa suuruusluokassa, voidaan siirtyä tarkastelemaan mitoituksen tuloksia tarkemmin. Mikäli arvot herättävät epäilyksiä, tulee käyttäjän palata tarkistamaan lähtötietojen oikeellisuus. Tässä vaiheessa on myös syytä tehdä mahdolliset poikkileikkausluokkaa korottavat toimenpiteet, jos poikkileikkausluokalle on asetettu erityisvaatimuksia.

7.2.2 Poikkileikkausluokan korottaminen

Mikäli poikkileikkauksen poikkileikkausluokkaa halutaan korottaa, täytyy ensin tarkistaa, mikä osa poikkileikkausta on määräävä, eli minkä osan poikkileikkausluokka on kaikkein suurin. WQ-ulokepalkin luonteesta johtuen hyvin usein alalaipan poikkileikkausluokka on määräävä. Poikkileikkausluokan korottamiseen on tässä tapauksessa kaksi mahdollista tapaa. Toinen, ehkä selkein tapa on yksinkertaisesti paksuntaa alalaippaa. Koska alalaipan poikkileikkausluokkaan vaikuttaa ainoastaan alalaipan vapaa mitta uumasta, on mahdollista että poikkileikkausluokkaa saadaan parannettua jopa pienentämällä teräsmäärää siten, että tarkistetaan, onko ontelolaattojen tukipintaa mahdollista pienentää, ja näin ollen lyhentää alalaipan vapaata mitta. Tällä toimenpiteellä, tai saumavalun leveyttä pienentämällä saadaan alalaipan hoikkuutta pienennettyä ja poikkileikkausluokkaa korotettua.

7.2.3 Alalaipan kestävyys

Mikäli koko palkin taivutuskestävyys ei riitä, on syytä tarkistaa, vaikuttaako alalaipan poikittainen taivutus koko palkin y-akselin suhteen tapahtuvaan taivutuskestävyyteen. Tapauksessa, jossa alalaipan käyttöaste on yli 50 prosenttia, käyttäjä voi tarkistaa saavutetaanko tarvittava taivutuskestävyys lisäämällä alalaipan paksuutta vain sen verran, että poikittaisen taivutuksen käyttöaste jää alle 50 prosentin.

7.2.4 Leikkauslommahdus

Leikkausloimahtamisen suurin vaikutus näkyy poikkileikkauksen leikkauskestävyydessä. Mikäli leikkausvoiman käyttöaste on yli 50 prosenttia, on tällä vaikutusta koko palkin y-akselin suhteen tapahtuvaan taivutuskestävyyteen. Mikäli taivutuskestävyys ei riitä,

on syytä tarkistaa, saavutetaanko tarvittava taivutuskestävyys korottamalla uuman paksuutta vain sen verran, että leikkauskestävyyden käyttöaste on alle 50 prosenttia.

7.2.5 Taivutuskestävyys

Mikäli lukujen 7.2.3 ja 7.2.4 toimenpiteet eivät riitä korottamaan palkin taivutuskestävyyttä riittävästi, laippojen paksuuden kasvattaminen on ehdottomasti tehokkain tapa korottaa palkin taivutuskestävyyttä. Tämä tulee kuitenkin suorittaa siten, että palkin tasapaino säilyy. Esimerkki tasapainotetusta palkista on esitetty liitteessä 1. Lisäksi taivutuskestävyyttä voidaan parantaa tehokkaasti myös yksinkertaisesti palkin korkeutta kasvattamalla. Tällöin kuitenkin usein joudutaan tilanteeseen, jossa laataston yläpinnan tasoero WQ-palkin yläpinnan suhteen joudutaan korjaamaan käyttämällä laatoille palkkihyllyjä. Tässä tapauksessa palkin palomitoituksen reunaehdot muuttuvat, minkä takia tämä vaihtoehto koetaan usein viimeiseksi vaihtoehdoksi.

7.2.6 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyttä voidaan korottaa parhaiten kasvattamalla uuman paksuutta. Usein leikkauskestävyys ei itsessään tule määrääväksi, ellei ulokkeen viereisen tuen välittömässä läheisyydessä ole raskaita seiniä, jotka eivät merkittävästi lisää taivutusmomenttia, mutta kasvattavat leikkausvoimaa.

7.2.7 Käyttörajatilan jännitykset

Käyttörajatilan jännityksen käyttöaste on yleensä tavanomaisissa kuormitustapauksissa samaa suuruusluokkaa taivutuksen käyttöasteeseen verrattuna. Mikäli kuitenkin käyttörajatilan jännitykset ylittävät sallitut rajat, täytyy käyttäjän kartoittaa jännitykseen vaikuttavista tekijöistä vaikutuksiltaan suurin. Useimmiten käyttörajatilan jännityksiä voidaan hallita parhaiten kasvattamalla nimenomaan alalaipan paksuutta.

8 WQ-palkin pulttiliitos kannakelevyihin

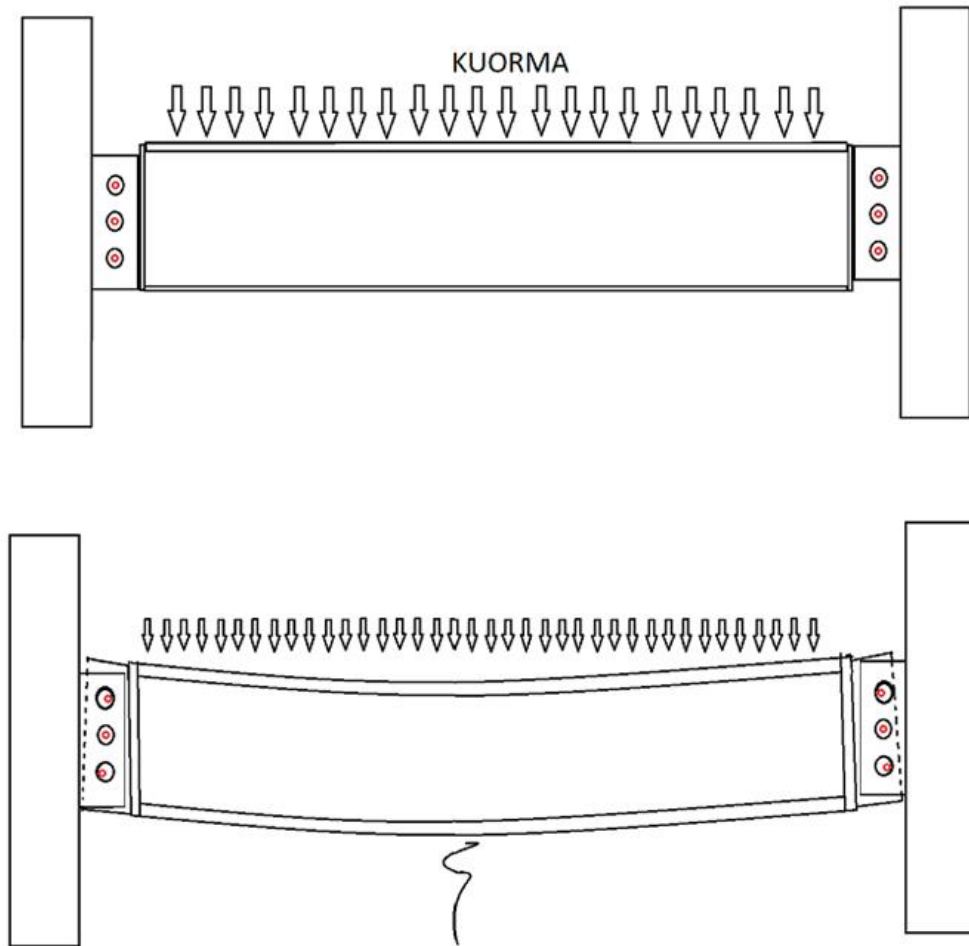
Tässä kappaleessa käsitellään erästä WQ-palkin ja palkkia kannattelevan pilarin välistä liitostyyppiä. Tämän insinööriyön puitteissa liitoksen mitoitusyökalua ei ole liitetty WQ-ulokepalkkilaskuriin. Tämän työn yhteydessä kuitenkin syntyi useita rinnakkaisia laskupohjia, joista ehkä merkittävimpana voidaan pitää WQ-palkkilaskuria yksiaukkoisen palkin mitoittamiseen. Liitoksen mitoitus onkin alustavasti suunniteltu yksiaukkoisen WQ-palkin laskuriin, mutta mitään estettä liitostyökalun lisäämiselle ulokepalkkilaskuriin ei ole. Tämä kappale käsittelee karkealla tasolla pulttiliitoksen mitoitusta ja periaatteita, joiden mukaan liitoksen toimintaa pyritään mallintamaan. Kuvassa 46 esitetään erään WQ-palkin ja liittopilarin välinen kannakelevyliitos.



Kuva 46. WQ-palkin ja liittopilarin välinen kannakelevyliitos

Kuvatun liitoksen mitoittamisessa erityisen tärkeäksi muodostuu liitoksen luokittelu sen toiminnan perusteella. Käytännössä tämä voidaan kuvata liitoksen kykyä kiertyä vallitsevissa olosuhteissa. Itse WQ-palkkia mitoittavien voimasuureiden laskennan kannalta on usein perusteltua ja suotavaa käyttää nivelellistä rakennemallia. Liitoksen pulttien

kestävyyden kannalta on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää, että liitoksella on riittävä kyky kiertyä. kuva 47 esittää tilanteen, jossa WQ-palkin kiertymäkyky ei ole riittävä.

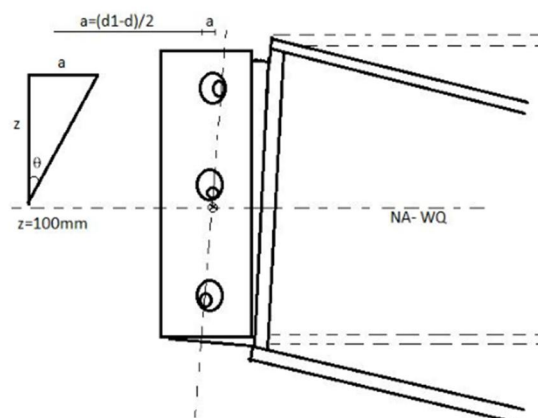
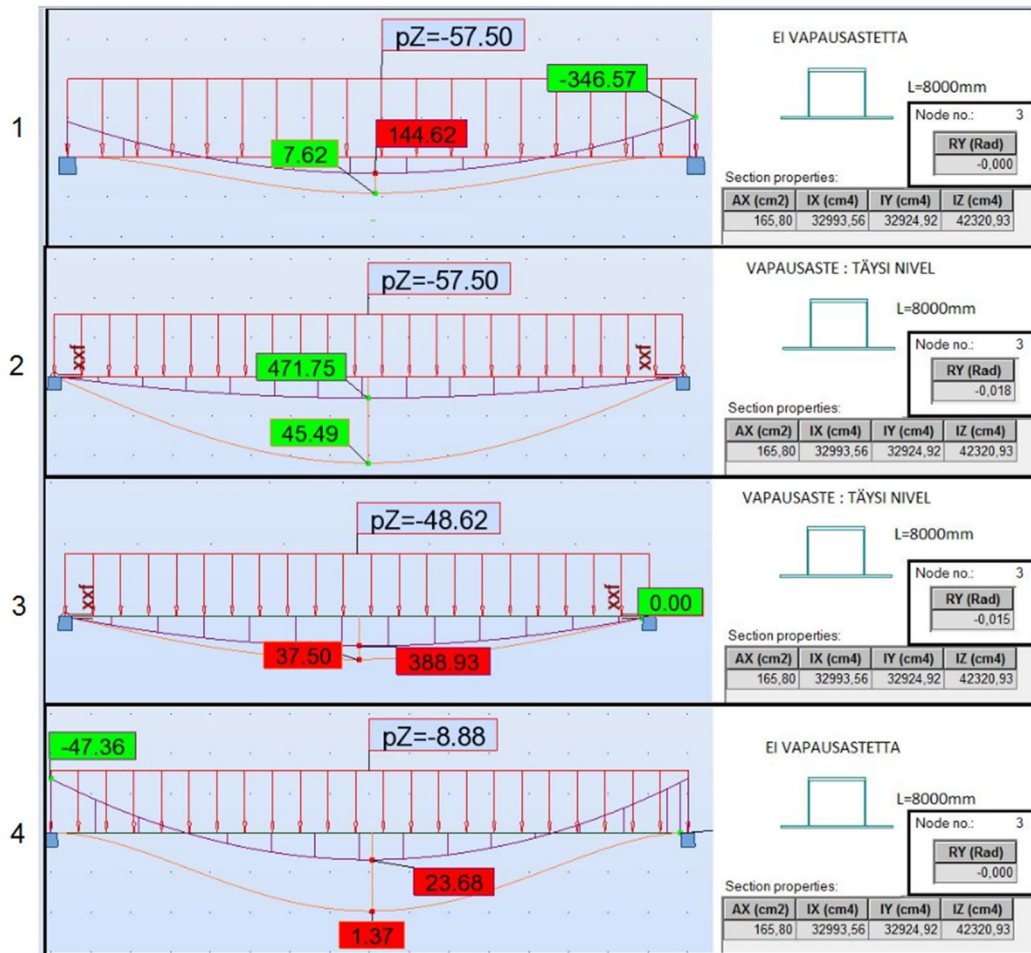


Osa kuormasta on potentiaalienergiana palkin taipumassa, ja kimmoisella alueella palkki toimii kuin jousi.

Kuva 47. WQ-palkki kiertyy kannakelevyjen reikien asennustoleranssin salliman kiertymän

Kun WQ-palkkia kuormitetaan, kuorma tekee työtä ja se varastoituu palkkiin potentiaalienergiaksi. Palkki toimii kuten jousi, mikäli voidaan olettaa, että liikutaan kimmoisalla alueella. Tässä vaiheessa kuvassa 47 esitetyt pultit, kuvassa punaisella, ovat kiertyneet WQ-palkin painopisteen suhteen niin paljon, että pultin reuna alkaa kiilautua kannakelevyissä olevan reiän reunaa vasten. Tilanne kuitenkin edellyttää, että WQ-palkki kiertyy riittävästi. Voidaankin avata ajatusta yksinkertaisen mallin avulla. On olemassa palkki, joka on liitetty pilariin pulttiliitoksella, jolla on tietty kyky kiertyä. Tämän kierty-

män mahdollistaa pulttien ja pulttien reikien kokoero, pultin reikien koko on usein 2 mm isompi pulttiin verrattuna. On hyvin yksinkertaista laskea se kuormitus, mikä palkille voidaan asettaa, jotta palkin kannakelevy kiertyy juuri sallitun määrän. Asiaa on pyritty havainnollistamaan kuvassa 48.



$$\theta_{\text{sall}} = 0.015 \text{ rad}$$

$$q_{\text{sall}} = \frac{a \cdot 24 \cdot E \cdot I}{L_1^3 \cdot z}$$

Kuva 48. Sallitun kuormituksen periaate

Mikäli todellinen kuormitus ei ylitä tätä kuormaa, liitos pääsee kiertymään vapaasti ja toimii nivelellisesti. Tilanne on kuvattu kuvan 48 kohdassa 2. Kuvan 48 kohdassa 3 on kuvattu tilanne, jossa kuvan 47 palkkia kuormitetaan siten, että sen kiertymävara on lopussa. Kun tässä vaiheessa palkille lisätään kuormitusta, ei liitos enää kierry vapaasti. Tässä tilanteessa liitokseen alkaa muodostua tukimomenttia, joka siirtyy pulttien välityksellä kannakelevyn reunapuristuksena. Edellä kuvattu tilanne on esitetty kuvassa 48 kohdassa 4. Kun kuormaa lisätään entisestään, momentti ja reunapuristus kasvavat. Todellisuudessa momentti ei voi kasvaa mielivaltaisen suureksi, sillä tämä liitokseen syntynyt voima tekee työtä kiertymän kasvamisen estämiseksi. Lisäksi voimat tekevät liitoksessa muodonmuutostyötä, kun kannakelevyn reuna puristuu kasaan. Tämän seurauksena voiman kasvaessa joko pultti katkeaa leikkausvoimasta tai kannakelevyn reuna antaa periksi ja liitokseen syntyneiden voimien tekemä työ säilyy kannakelevyn pysyvinä muodonmuutoksina. Tähän tilanteeseen päästään todennäköisimmin silloin, kun kannakelevyn reunapuristuskestävyys on pultin leikkauskestävyyttä pienempi. Tämä siis takaa sen, että kannakelevyn reuna myötää ennen kuin pultit katkeavat hauraasti leikkauksesta.

Käytännössä kannakelevyjen kiertymävaraa on hyvin hankalaa määritellä tarkasti, sillä puhutaan vain muutamien millimetrien asennustoleransseista, jolloin ympäröivien rakenteiden dimensiot ovat niihin verrattuna tuhatkertaisia. On kuitenkin muistettava, että kaikesta tästä huolimatta WQ-palkin kannakelevyjen reikien välisen keskiöetäisyyden on vastattava pilarin puoleisten kannakelevyjen reikien keskiöetäisyyttä tai palkkia ei voida asentaa paikalleen ilman erityistoimenpiteitä. Siksi onkin perusteltua, että oletetaan pulttien kiertymävaran olevan puolet asennustoleranssista, mikä vastaa tilannetta, jossa pulttien keskiöetäisyys on täsmälleen oikea.

Kuten edellä on osoitettu, palkin kiertymällä on suuri merkitys pulttiliitoksen mitoituksessa. Näin ollen onkin syytä kiinnittää huomiota erilaisten kuormitustapauksien synnyttämiin kiertymiin tukien kohdalla. Tasan jakautuneen kuorman aiheuttama kiertymä tuilla on varsin yksinkertaisesti johdettavissa taipumaviivan differentiaaliyhtälön avulla. Kaava on johdettu liitteessä 3. Kiertymä on samansuuruinen molemmilla tuilla, mutta kiertymän suunta on eri. Tämä hoituu lausekkeen etumerkin avulla. Yleisesti tasaisen kuorman aiheuttama kiertymä on muotoa:

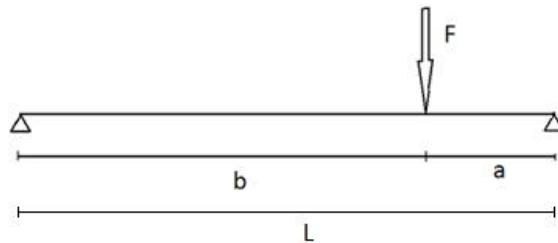
$$v'(x) = \left(\frac{q * L * x^2}{4} - \frac{q * x^3}{6} - \frac{q * L^3}{24} \right) * \left(-\frac{1}{E * I} \right)$$

mistä saadaan:

$$v'(0) = \frac{q * L^3}{24 * E * I} \quad (81)$$

$$v'(L) = -\frac{q * L^3}{24 * E * I} \quad (82)$$

Mikäli palkkia kuormittaa pistevoima, muuttuu kiertymänkin lausekkeet mutkikkaammiksi. Tämä johtuu osittain siitä, että palkille tulee yksi epäjatkuvuuskohta lisää, sekä siitä, että pistevoima voi sijaita käytännössä missä tahansa palkin jännteellä. Vastaavat kiertymän arvot ovat kuitenkin johdettavissa täysin samoin perustein soveltamalla kaavaa 61. Pistevoiman tapauksessa kiertymän arvot voidaan johtaa seuraavan rakennemallin ja vaiheiden mukaisesti:



Kuva 49. Pistevoiman aiheuttaman kiertymän kannalta oleellinen rakennemalli

Ratkaistaan palkin tukivoimat momenttitasapainoehdosta, josta saadaan:

$$A_y = \frac{F * a}{L}$$

$$B_y = \frac{F * b}{L}$$

Tukivoimien avulla voidaan kirjoittaa kuormasta ja palkin pituudesta riippuvainen momenttiyhätälö, joka on muotoa:

$$M(x) = \frac{F \cdot a \cdot x}{L}$$

Kyseinen yhtälö on kirjoitettu palkin vasemmasta päästä oikealle. Integroidaan momenttiyhtälö kahdesti x :n yli, jolloin saadaan taipuman derivaatan ja taipuman lausekkeet:

$$v'(x) = \left(\frac{F \cdot a \cdot x^2}{2 \cdot L} + c_1 \right) * \left(-\frac{1}{E \cdot I} \right)$$

$$v(x) = \left(\frac{F \cdot a \cdot x^3}{6 \cdot L} + c_1 * x + c_2 \right) * \left(-\frac{1}{E \cdot I} \right)$$

Reunaehtojen ratkaisemiseksi täytyy kirjoittaa uusi momenttiyhtälö, joka on voimassa pistevoimasta katsottuna palkin oikealla puolella. Momenttiyhtälöstä saadaan taipumaviivan derivaatta sekä taipuman lauseke, jotka ovat voimassa pistevoiman oikealla puolella. Kyseiset lausekkeet ovat muotoa:

$$v_2'(x) = \left(\frac{F \cdot a \cdot x^2}{2 \cdot L} - \frac{F \cdot x^2}{2} + F * b * x + c_3 \right) * \left(-\frac{1}{E \cdot I} \right)$$

$$v_2(x) = \left(\frac{F \cdot a \cdot x^3}{6 \cdot L} - \frac{F \cdot x^3}{6} + \frac{F \cdot b \cdot x^2}{2} + c_3 * x + c_4 \right) * \left(-\frac{1}{E \cdot I} \right)$$

Integroimisvakioiden ratkaisemiseksi hyödynnetään reunaehtoja, jotka muodostuvat tukipisteiden taipumasta sekä taipuman ja kiertymän jatkuvuudesta eri yhtälöiden välillä. Sijoittamalla integroimisvakiot yhtälöstä toiseen ja muodostamalla yhtälöpari eri integroimisvakioiden välille saadaan:

$$c_2 = 0$$

$$c_3 = c_1 - \frac{F \cdot b^2}{2}$$

$$c_4 = \frac{F \cdot b^3}{6}$$

$$c_1 = \left(\frac{F \cdot b^2}{2} + \frac{F \cdot L^2}{6} - \frac{F \cdot b \cdot L}{2} - \frac{F \cdot a \cdot L}{6} - \frac{F \cdot b^3}{6 \cdot L} \right)$$

Edellä lausuttujen integroimisvakioiden avulla saadaan kiertymälle lausekkeet sekä tuella A että tuella B. Nämä kiertymän lausekkeet ovat muotoa:

$$v'(0) = \left(\frac{F*b^2}{2} + \frac{F*L^2}{6} - \frac{F*b*L}{2} - \frac{F*a*L}{6} - \frac{F*b^3}{6*L} \right) * \left(-\frac{1}{E*I} \right) \quad (83)$$

$$v'(L) = \left(\frac{F*a*L}{3} - \frac{F*L^2}{3} + \frac{F*b*L}{2} - \frac{F*b^3}{6*L} \right) * \left(-\frac{1}{E*I} \right) \quad (84)$$

Näin on johdettu tukipisteiden kiertymille kaavat tasaisen kuormituksen tapauksessa sekä pistevoinan vaikuttaessa palkin jänteellä. Kiertymät voidaan superposition nojalla laskea osissa ja summata lopuksi yhteen.

Kun tiedetään, kuinka paljon palkki kiertyy kuormituksesta, voidaan tarkistaa, riittääkö liitoksen kiertymävara. Kiertymän aiheuttama siirtymä voidaan laskea kertomalla ruuvi-ryhmän etäisimmän ruuvin keskiötäisyys WQ-palkin painopisteestä. Lisäksi on syytä tarkastella, kuinka paljon kuormaa tarvitaan vastaavan sallitun kiertymän aikaansaamiseksi. Esimerkiksi pelkän tasaisen kuormituksen osalta sallitun kuormituksen yhtälö voidaan esittää seuraavassa muodossa:

$$q_{sall} = \frac{\frac{1}{2}a_{tol}*24*E*I}{L^3*z_{max}} \quad (85)$$

missä:

a_{tol} = asennustoleranssi

z_{max} = uloimpien ruuvien keskiötäisyyksistä suurin palkin painopisteeseen nähden

Lisäksi on syytä ottaa huomioon muun muassa mahdollisen esikorotuksen vaikutus sekä mahdollisten pistekuormien vaikutus. Näin ollen saadaan sallitulle kuormitukselle seuraava yhtälö:

$$q_{sall} = \frac{\left(\frac{1}{2}a_{tol}+c_{11}-c_{22}\right)*24*E*I}{L^3*z_{max}} \quad (86)$$

missä:

$$c_{11} = \frac{16 \cdot \vartheta}{5 \cdot L}$$

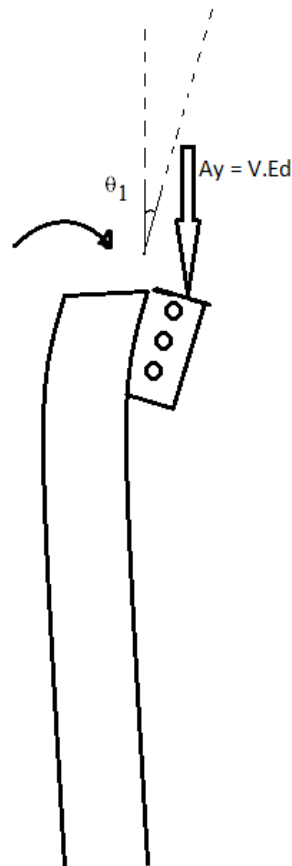
$$c_{22} = \theta_F \cdot z_{max}$$

missä:

ϑ = esikorotus

θ_F = pistevoiman aiheuttamista tukien kiertymistä suurempi

Edellä kuvattujen palkin kiertymään vaikuttavien tekijöiden lisäksi myös palkkeja kannattelevien pilareiden jäykkyydellä on merkitystä palkin kiertymään. Pilarin pään kiertyessä epäkeskeisestä tukivoimasta saa palkki samalla enemmän tilaa kiertyä. Kuvassa 50 esitetään hahmotelma tilanteesta.



Kuva 50. Pilarin pään kiertymä epäkeskisen tukivoiman vaikutuksesta

Pilarin pään kiertymän laskemiseksi tarvitaan pilarin jäykkyys. Pilarin jäykkyysluku on $\frac{1}{k}$, mutta usein se esitetään isolla kirjaimella "S". Käytännössä pilarin jäykkyyttä kuvainnollistaa se, kuinka monta joulea muodonmuutostyötä tarvitaan, jotta pilari kiertyy yhden radiaanin. Sama asia voidaan ilmoittaa rakennustekniikassa useimmin käytetyllä tavalla. Joulet muutetaan newtonmetreiksi ja ratkaistaan, kuinka suuri momentti tarvitaan pilarin pään kiertämiseksi yhden radiaanin. Tässä yhteydessä voidaan kirjoittaa mastopilarin pään kiertymälle kaava, joka on muotoa:

$$\theta_1 = \frac{M_{V.Ed} * H_{pilari}}{E_{pilari} * I_{pilari}}$$

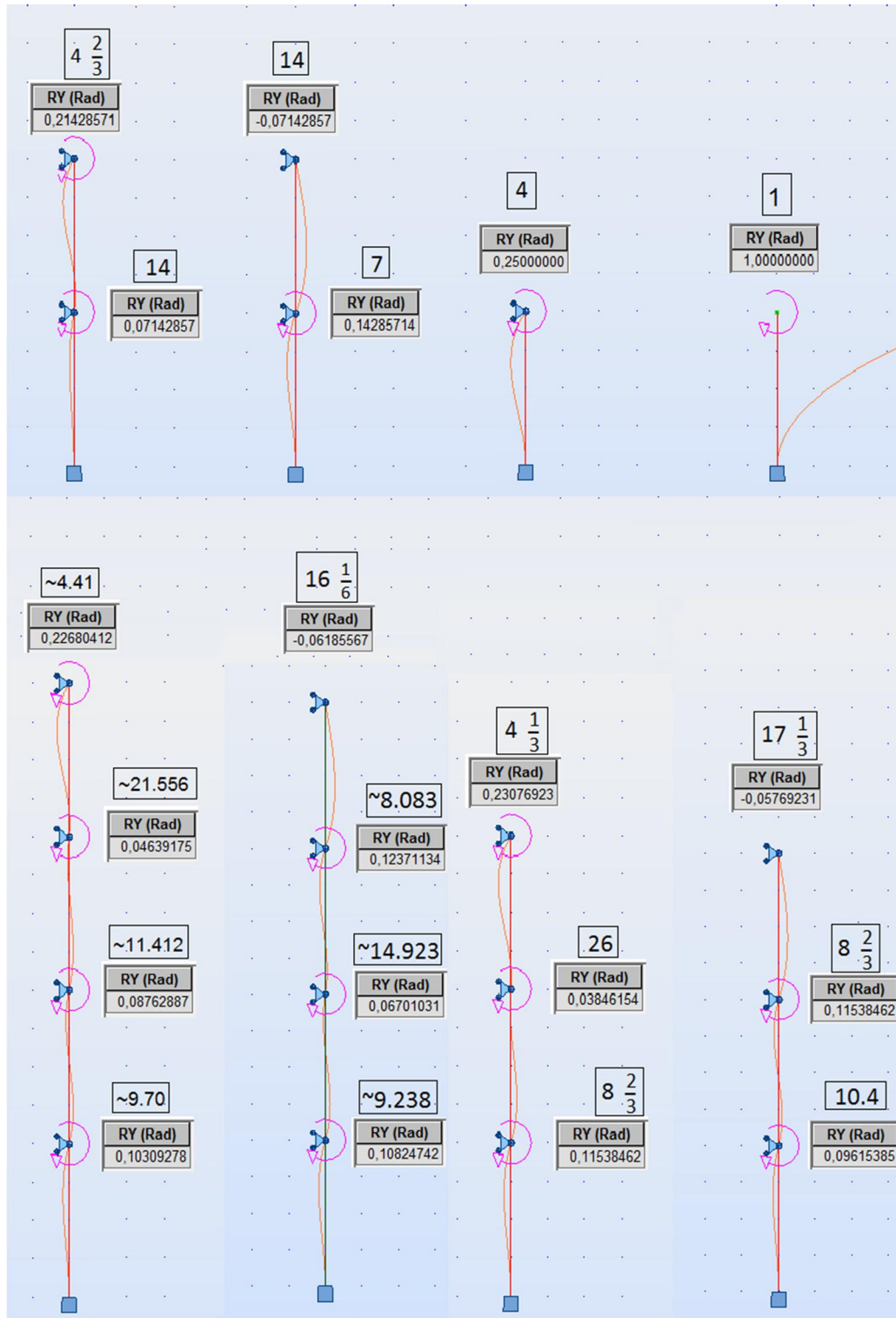
missä:

$$M_{V.Ed} = V_{k.Ed} * e_2$$

e_2 = pilarin reunan ja korvakkeen reikien keskikohdan välinen etäisyys

Tästä voidaan siis päätellä, että mitä jäykempi pilari on kyseessä sitä vähemmän palkin tukireaktio aiheuttaa kiertymää pilarin päässä. Näin ollen epäjäykkä pilari mahdollistaa palkille suuremmat kiertymät. Tähän kiertymään kuitenkin vaikuttaa merkittävästi muun muassa mitoitettavan palkin yläpuolisten ja alapuolisten vastaavien kerroksien lukumäärä. Esimerkiksi vertailtaessa kaksikerroksisen kehän alemman kerroksen jäykkyyttä ylemmän kerroksen jäykkyyteen huomataan, että alempi kerros on ylempään kerrokseen verrattuna kolme kertaa jäykempi. Tämä voidaan havainnollistaa laskemalla kehärakenteen liitoskohtien kiertymiä eri tilanteissa. Vertailujäykkyytenä voidaan pitää mastopilarin jäykkyyttä, joka on muotoa $\frac{E_{pilari} * I_{pilari}}{H_{pilari}}$. Vastaavasti, jos mastopilarin yläpäähän laitetaan vaakasiirtymät estävä tukipiste, jäykkyys lisääntyy nelinkertaiseksi mastopilariin verrattuna. Esimerkiksi kolmikerroksisen kehän keskimmäisen liitoksen jäykkyys mastopilariin verrattuna on näin ollen 26-kertainen. Tämä selittyy yläpuolisten ja alapuolisten kerroksien tukivoimien aiheuttamilla kiertymillä, sillä ylimmän kerroksen ja alimman kerroksen kiertymät vastustavat keskimmäisen kerroksen kiertymää. Kuvassa 51 on havainnollistettu asiaa statiikan avulla. Kuvan mastopilariin vaikuttaa sellainen pistemomentti, että pilarin jäykkyys huomioiden kiertymäksi muodostuu 1 radiaani ja pilarin pään vaakasiirtymä on näin ollen tasan puolet pilarin pituudesta. Kaikissa kuvan muissa tapauksissa vaikuttaa samansuuruinen pistemomentti, mitä kuvataan kiertyvällä nuolella liitoskohdassa. Esitetyn kiertymän yläpuolelle on kirjoitettu suhdelu-

ku kyseisen kiertymän ja vertailtavan mastopilarin kiertymän välillä. Kuten kuvasta 51 voidaan havaita, kerroksien lukumäärän ja vaikuttavan momentin välillä on selvä yhteys. Jos rakenteen ylimmässä kerroksessa ei vaikuta momenttia, on alemman kerroksen liitoksen jäykkyys puolet ylimpään kerrokseen verrattuna. Kerroslukumäärän kasvassa kiertymien ja liitoskohtien jäykkyyksien suhde ei ole enää yhtä selvä. Voidaan kuitenkin havaita, että kerroksia lisäämällä liitoksien jäykkyys keskialueen kerroksille tasaantuu noin 12-kertaiseen jäykkyyteen, ylin kerros noin 4,4-kertaiseen jäykkyyteen, toiseksi ylin kerros noin 22,4-kertaiseen jäykkyyteen ja alin kerros noin 9,2-kertaiseen jäykkyyteen mastopilariin verrattuna. Jatkamalla aiheen tutkimista olisikin mahdollista löytää palkin pään kiertymäkyvyn ja pilarin kiertymän välille yhteys.



Kuva 51. Eri rakenteiden mukaiset liitoskohtien jäykkyyksien suhteet

8.1 Voimien jakaantuminen pulttiryhmissä

Mikäli palkin kuormitus on pienempi kuin kiertymän kannalta suurin sallittu kuormitus, voidaan pulttiliitos mitoittaa puhtaalle leikkaukselle. Lisäksi tulee tarkistaa, että kaikki vaadittavat reunaetäisyyden ehdot täyttyvät. Nämä ehdot esitetään eurokoodin osassa SFS-EN-1993-1-8. Huomionarvoista reunaetäisyyksien määrittelyssä on tapa, jolla etäisyydet pyrkivät johdattamaan liitoksen toimintaa ja mahdollista murtotapaa. Esimerkiksi pulttien keskiöetäisyyksien täytyy olla miltei kaksinkertainen verrattuna pultin reunaetäisyyteen palkin pituussuunnassa. Tämä viittaa siihen, että pulttiryhmän kiertyessä on suotavaa, että kannakelevyn reuna puristuu ja antaa hieman periksi. Tämän seurauksena suhteettoman suuria leikkausvoimia ei pääse muodostumaan pulttiliitokseen.

Mikäli pulttiryhmä kiertyy kuormista enemmän kuin pultilla olisi teoriassa varoja kiertyä, täytyy suunnittelijan laskea se osuus kuormasta, minkä tekemä työ on varastoitunut palkkiin potentiaalienergiaksi, ja kuinka paljon kuormaa on vielä ”irrallaan”. Tämä voidaan laskea yksinkertaisesti kuormien erotuksesta:

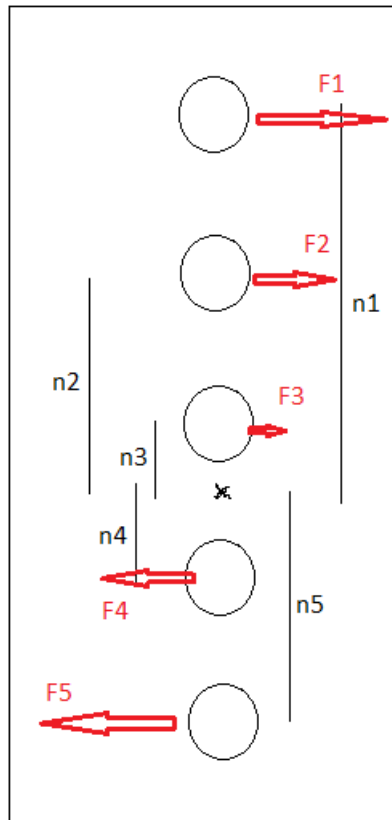
$$q_{\text{jäännös}} = q_k - q_{\text{sall}}$$

Jäljelle jäänyt kuormitus edustaa sitä osaa kuormasta, joka ei suoraan voi tehdä työtä palkin taivuttamiseksi. Pultit ovat tässä vaiheessa kiilautuneet reikien sivuille, eivätkä ne näin ollen pääse enää vapaasti kiertymään. Voidaankin olettaa, että tässä vaiheessa tuen kohdalle alkaa muodostua momenttia, joka voidaan laskea kaavasta:

$$M_{Ed, \text{jäykkä}} = \frac{q_{\text{jäännös}} * L^2}{12} \quad (87)$$

Momentin katsotaan tässä vaiheessa jakautuvan pulttien kesken lineaarisesti. Riippuen pulttien lukumäärästä, sekä pulttien välisestä etäisyydestä palkin kiertokeskiöön, saadaan ratkaistua yksittäisten pulttien voimakomponentit. Esimerkkinä voidaan pitää tilannetta, jossa on 5 pulttia ja kiertokeskiö sijaitsee keskimmäisen pultin keskipisteessä. Tällöin saadaan momenttitasapainoyhtälöstä kiertokeskiön suhteen etäisimpien pulttien voimakomponenteiksi $\frac{M_{Ed}}{5 * p}$. Tämä tilanne on voimassa kuitenkin vain harvassa tilanteessa, jolloin on suotavaa kirjoittaa yhtälö, joka pätee myös kaikilla muilla keskiöetäi-

syyksillä ja ruuvien lukumäärillä. Kuvassa 52 esitetään viiden pultin tapaus, josta voidaan johtaa myös neljän ja kolmen pultin tapaukset. [11.]



Kuva 52. korvakelevy ja lineaarinen voimien jakautuminen

Lienee selvää, että pulttiryhmän etäisin pultti palkin kiertokeskiöstä nähden saa suurimman voimakomponentin. Ratkaistaan siis tämän suuruus olettaen, että WQ-palkin painopiste on korkeintaan poikkileikkauksen keskellä, muttei sen yläpuolella.

$$F_1 = \frac{\frac{1}{2} M_{Ed} \cdot j_{äykkä} \cdot n_1}{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2 + n_5^2} \quad (88)$$

Kaava on voimassa mielivaltaisen suurella pulttien määrällä sillä oletuksella, että pultit ovat yhdessä rivissä. Voimakomponentit on siis johdettu kiertoakeskiön suhteen kirjoitettusta momenttitasapainoehdosta. Liitoksessa vaikuttava momentti jakautuu kannakelevyjen pulteille tasan, jolloin puolet momentista voidaan katsoa välittyvän toisen kannakkeen pulttien välityksellä ja puolet toisen kannakkeen pulttien välityksellä. Tästä syystä momentti kerrotaan tekijällä $\frac{1}{2}$. Koska tiedetään, että voima lisääntyy momentti-

varren kasvaessa, voidaan kaikkien voimakomponenttien välinen yhteys ratkaista pulttien välisten etäisyyksien avulla. Näin ollen siis saadaan:

$$F_2 = \frac{n_2}{n_1} * F_1$$

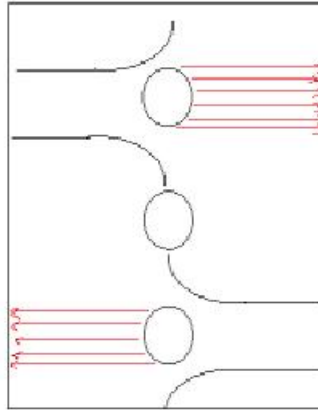
$$F_3 = \frac{n_3}{n_2} * F_1$$

$$F_4 = \frac{n_4}{n_2} * F_1$$

$$F_5 = \frac{n_5}{n_1} * F_1$$

Joissain tapauksissa voi olla aiheellista tarkistaa, ettei pulttiryhmän alimman pultin voimakomponentti ole suurempi kuin pulttiryhmän ylimmän pultin voimakomponentti.

Periaatteessa voidaan katsoa, että mitoitus on suoritettu varmalla puolella olevin oletuksin, mikäli mitoituksessa käytetään lineaarisen jakautumisen mukaista voimakomponenttia. On kuitenkin mahdollista, että voimakomponentti ei koskaan saavuta suurinta arvoaan, mikäli kannakelevyn suurin sallittu puristusjännitys ylittyy ja kannakelevyn reuna myötää ja puristuu kasaan. Tämä edellyttää, että vaakakomponentin aiheuttama jännitys kannakelevyn reunassa ylittää teräksen myötörajan. Tämän perusteella voidaan laskea kaksi asiaa; kuinka paljon kannakelevyn reuna voi puristua kasaan siten, että se toimii vielä kimmoisasti sekä se voima, mikä tarvitaan kannakelevyn reunan myötöjännityksen saavuttamiseksi. Rakenneteräksen osalta yleensä pidetään hyväksyttävänä olettaa, että kappaleen suhteellinen pituuden muutos ϵ ei voi ylittää arvoa 0,15 prosenttia ilman, että kappaleeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Lisäksi tiedetään rakenneteräksen myötöjännitys, minkä perusteella voidaan laskea edellä kuvatut seikat. Ainoa arvioitavaksi jäävä asia lienee jännityksen jakautuminen pultin puristuessa kannakelevyn reunaan. Yksinkertaistettu malli olettaa jännityksen jakautuvan kuvan 53 mukaisesti.



Kuva 53. Kannakelevyn reunan jännitys jakauma pultin puristuessa reunaa vasten

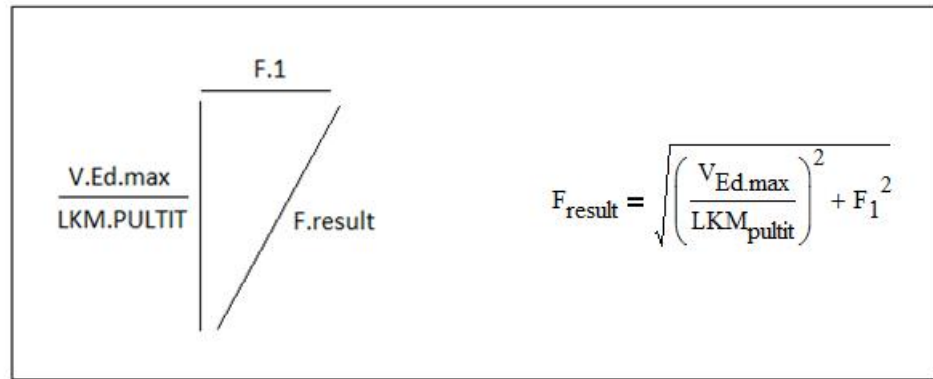
Näiden lähtötietojen valossa voidaankin approksimoida liitoksen toimintaa seuraavasti:

$$kimmoinen\ puristuma = e_1 * 0,15 \%$$

$$F_{kimmoinen.puristuma} = f_y * d_{pultti} * t_{kannakelevy}$$

Vaikka pysyviä muodonmuutoksia alkaakin ilmentyä, kun suhteellinen venymä saavuttaa 0,15 prosentin rajan, on kuitenkin syytä suhteuttaa myötöön rinnastettava suhteellinen venymä vetokokeiden perusteella mitattuun myötörajan arvoon. Mikäli myötörajan katsottaisiin alkavan siitä, kun ensimmäiset pysyvät muodonmuutokset syntyvät, olisi esimerkiksi S355 teräslaadun myötörajan arvo 315 MPa.

Seuraavaksi täytyy tarkistaa, että kannakelevyn reuna voi tarvittaessa alkaa myödetä, mikäli voimakomponentti kasvaa riittävän suureksi. Tämä kuitenkin edellyttää, että pultin leikkauskestävyys on vähintään myötöön vaadittavan voimakomponentin sekä liitoksen leikkausvoiman resultantin suuruinen. Tämä voidaan laskea kuvan 54 mukaisesti. Kuvassa $V_{Ed,max}$ tarkoittaa suuremmalta ontelolaattakentältä tulevaa kuormaa. Voidaan siis ajatella, että toinen kannakelevy kannattelee toiselta puolelta palkkia tulevia kuormia ja toinen toiselta puolelta tulevia kuormia. Näin huomioidaan mahdollinen väännön haittaava vaikutus.



Kuva 54. Voimaresultantin laskenta suorakulmaisen kolmion trigonometrian avulla

Jotta liitoksen kapasiteetti voidaan lopullisesti varmentaa, tarvitaan liitoksen kestävyysarvot. Näiden laskemiseksi tarvitaan eurokoodin ohjeita, jotka löytyvät osasta SFS-EN-1993-1-8.

Pultin leikkauskestävyys lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$F_{v.Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_{pultti}}{\gamma_{M2}} \quad (89)$$

missä:

$\alpha_v = 0,6$ jos lujuusluokka on 4.6, 5.6 tai 8.8 ja kierteet ovat leikkaustasossa

$\alpha_v = 0,5$ jos lujuusluokka on 4.8, 5.8, 6.8 tai 10.9 ja kierteet ovat leikkaustasossa

$\alpha_v = 0,6$ jos kierteet eivät ole leikkaustasossa

Kannakelevyn reunapuristuskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (90)$$

Reunapuristuskestävyyden laskemisessa tarvittavat puuttuvat parametrit esitetään eurokoodin SFS-EN-1993-1-8 luvussa 3.6.1 taulukossa 3.4 (kuva 55).

Taulukko 3.4: Kestävyyksien mitoitusarvot yksittäisille kiinnittimille, joihin kohdistuu leikkaus ja/tai veto

Murtumismuoto	Ruuvit	Niitit
Leikkauskestävyys leikettä kohti	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>- kun ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa (A on ruuvien jännityspoikkipinta-ala A_s):</p> <ul style="list-style-type: none"> - lujuusluokat 4.6, 5.6 ja 8.8: $\alpha_v = 0,6$ - lujuusluokat 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9: $\alpha_v = 0,5$ <p>- kun ruuvien kierteetön osa on leikkaustasossa (A on ruuvien bruttopoikkileikkauksen pinta-ala):</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\alpha_v = 0,6$ 	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Reunapuristuskestävyys ^{1), 2), 3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ <p>missä α_b on pienin arvoista α_d; $\frac{f_{ub}}{f_u}$ ja 1,0;</p> <p>siirrettävän voiman suunnassa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - levyn pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$; - muille kuin pään ruuveille: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ <p>kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - reunarivin ruuveille : k_1 on pienin arvoista $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5 - muille kuin pään ruuveille: k_1 on pienin arvoista $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5 	
Vetokestävyys ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>Missä $k_2 = 0,63$ uppokantaisille ruuveille, Muissa tapauksissa $k_2 = 0,9$.</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Tarkistus tarpeeton
Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

Kuva 55. Taulukko pulttiliitoksen reunapuristuskestävyyden laskemiseksi [12.]

Palamurtumiskestävyyden laskemiseksi tarvitaan kannakelevyn vedon rasittaman poikkipinnan pinta-ala sekä leikkauksen rasittaman poikkipinnan pinta-ala. Nämä voidaan laskea seuraavien kaavojen mukaan:

$$A_{nv} = (p_{1_1} + p_{1_2} + p_{2_1} + p_{2_2} + p_{2_{reuna}}) * t_{kannakelevy}$$

$$A_{nt} = e_1 * t_{kannakelevy}$$

missä:

A_{nv} = leikkauksen rasittama poikkipinta-ala

A_{nt} = vedon rasittama poikkipinta-ala

Näiden suureiden avulla voidaan laskea palamurtumiskestävyys seuraavalla kaavalla:

$$V_{eff.Rd} = \frac{\beta_{22} * f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}} \quad (91)$$

missä:

$\beta_{22} = 0,5$, sillä kuormitus on epäkeskinen

Kun kyseiset kestävyudet on selvitetty, voidaan selvittää liitoksen luokitus voimien jakautumisen suhteen. Tarkistettavat ehdot voidaan luokitella seuraavasti:

$$EHTO_1 = q_k \leq q_{sall.1}$$

$$EHTO_{2.1} = q_{sall.1} < q_k \leq q_{sall.2}$$

$$EHTO_{2.2} = F_{vaakakomponentti} \leq F_{kimmoisa.puristuma}$$

Mikäli ehto 1 täyttyy, voidaan liitos luokitella nivelelliseksi, jolloin liitos mitoitetaan puhtaalle leikkaukselle.

Ehdossa 2.1 $q_{sall.2}$ on se kuorma, mikä aiheuttaa sallitun kiertymän ja kimmoisan puristuman summan suuruisen vaakasiirtymän pultille. Mikäli ehto 1 ei täyty, mutta ehdot 2.1 ja 2.2 täyttyvät, voidaan liitoksen sanoa olevan liitoksen itsensä kannalta jäykkä. Tätä jäykkyyttä ei kuitenkaan tule soveltaa liitosta ympäröiviin rakenteisiin. Tällöin pulttiin vaikuttava suurin voima muodostuu vaakakomponentista F_1 sekä suurimmasta leikkausvoimasta, mikä jaetaan pulttien lukumäärällä. Suurin vaakakomponentti ei kuitenkaan voi ylittää sen voiman suuruutta, mikä tarvitaan kannakelevyn reikien reunan myötäämiseen, mikä tarkastetaan juurikin ehdosta 2.2. Tässä tilanteessa on huomioitava, että liitos on kaksipuoleinen, jolloin suurin vaikuttava leikkausvoima voidaan las-

kea huomioimalla vain toiselta ontelolaatastolta tulevat kuormat. Tämän yhteydessä täytyy kuitenkin varmistaa, että huomioidaan ontelolaatastoista se puoli, jolta kertyy suuremmat kuormat. Tämä toimenpide ottaa huomioon korvakkeisiin mahdollisesti vaikuttavan väännön. Suurin pulttiin vaikuttava voima voidaan laskea kuvan 54 ohjeen mukaisesti.

Mikäli ehto 1 ei täyty, eikä myöskään samanaikaisesti ehdot 2.1 ja 2.2 täyty, luokitellaan liitos osittain jäykäksi. Tämä tulee vastaan siis silloin, kun:

- kuorma aiheuttaa palkille suuremman kiertymän kuin kannakelevy mahdollistaa palkin kiertyä
- pultin leikkauskestävyys on suurempi kuin kimmoisan alueen puristumaan vaadittavan voiman sekä leikkausvoiman resultantti
- palkin kuormitus on suurempi, kuin kimmoisan puristuman huomioiva kuormitus $q_{sall.2}$
- voimavaakakomponentti on suurempi kuin se voima, joka tarvitaan kimmoisan alueen puristuman ylittämiseen.

Mikäli liitos kuitenkin luokitellaan jäykäksi, voidaan harkinnanvaraisesti ottaa käyttöön voimien plastinen jakauma. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kaikille pulteille tulee yhtäsuuret vaakakomponentit. On kuitenkin huomionarvoista, että kannakelevyn paksuudella on suuri merkitys siihen, voiko ruuviin kehittyvä vaakakomponentti aiheuttaa muodonmuutoksia kannakelevyn reunaan ennen kuin pultti katkeaa leikkausvoimasta. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirjassa esitetään taulukko, mistä voidaan lukea eri pulttikokojen suurimmat sallitut kannakelevypaksuudet. Erinomaisen huomionarvoista lienee kuitenkin se, että mikäli kannakelevyn reuna myötää, on tällöin kannakelevyn reunan suhteellinen pituuden muutos ϵ suuruudeltaan noin 5 prosenttia [4.]. Tämä suhteellinen pituuden muutos on jo niin iso suhteutettuna kiertymän vaatimiin vaakasiirtymiin, että voidaan lähestulkoon poikkeuksetta todeta liitos nivelelliseksi, jos kannakelevyn reuna myötää. Mikäli liitos kuitenkin luokitellaan jäykäksi, voidaan pulttien vaakakomponentit laskea seuraavalla kaavalla:

$$M_{Ed.jäykkä} = \frac{q_{jäänös} * L^2}{12} \quad (91)$$

$$F_{pl.vaakakomponentti} = \left(\frac{M_{Ed.jäykkä}}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \right) \quad (92)$$

Liitoksen mitoitusohjelman käyttämisen tuoma kokemus on kuitenkin osoittanut, että tilanne, jossa plastisen voimien jakautumisen pohjalta laskettu suurin leikkausvoima ylittäisi kannakelevyn reunan myötöön vaadittavasta voimasta ja leikkausvoimasta syntyvän resultantin suuruuden, on erittäin harvinainen. Lisäksi, kun huomioidaan myödon suhteellinen pituuden muutos, on pulteille käytännössä aina muodostunut riittävästi varaa kiertyä. Suhteutettuna palkin taivutusmomenttikapasiteettiin voidaan todeta, että taivutus murtaa palkin lähes kaikissa tapauksissa ennen voimien uudelleen jakautumista kannakelevyn reunan myötäämisen jälkeen. Jonkinlainen voimien osittaisen jakautumisen malli voitaisiin kuitenkin katsoa aiheelliseksi. Tämä tarkoittaisi siis sitä, että pulttiryhmän alimpien pulttien voimat jakautuisivat plastisen jännitysjakautuman perusteella ja kiertokeskiön viereiset pultit jakaisivat loput voimasta lineaarisesti etäisyyden funktiona. Liitteessä 8 esitetään yksiaukkoisen WQ-palkkilaskurin raportin osuus, joka mitoittaa tarvittaessa kannakelevyliitoksen. Liitteen 8 mukaisesti huomataan, että laskentapohjaan on liitetty graafinen malli kannakelevyistä ja siihen asemoiduista pulteista. Pultiliitoksen mitoittamiseen liittyy useita erilaisia reunaetäisyyksiä sekä keskiöetäisyyksiä. Ilman havainnollistavaa kuvaa suunnitellusta kannakelevystä reikineen on potentiaalinen riski, että suunnitelmiin tulee virheitä. Siksi laskentapohjien suunnittelussa onkin aina pyrittävä korostamaan selkeyttä ja visuaalisuutta tiettyyn rajaan asti.

8.1.1 Johtopäätökset liitoksen mitoituksesta

Liitoksien mitoittaminen tarkasti on osoittautunut hyvin haastavaksi. Useissa lähteissä todetaankin, että liitoksien mitoitus voi perustua empiirisiin tutkimustuloksiin ja hyväksi sekä luotettaviksi havaittuihin menetelmiin. On kuitenkin vaarallista tehdä oletuksia, jotka antavat tiettyjen reunaehtojen puitteissa liitoksille korkeamman kestävyuden. Esimerkkinä tästä voitaneen pitää juurikin liitoksen kykyä kiertyä. Pitää paikkansa, että useat käytännön kokeet ovat osoittaneet, että kannakelevyliitoksen kestävyys vastaa usein pulttien leikkauskestävyyden arvoa, ja liitoksen murto tapahtuu silloin, kun tuen leikkausvoima kasvaa pultin leikkauskestävyyttä suuremmaksi. Tämä kuitenkin perustuu siihen, että liitos ei kierry todellisuudessa useimmissa tapauksissa niin paljoa, että minkäänlaisia vaakakomponentteja pääsisi liitokseen muodostumaan. Tämä kuitenkin edellyttää muun muassa liittovaikutuksen taipumaa pienentävän osuuden huomioimista. Lisäksi palkkia kannattelevien pilareiden todellinen jäykkyys, vinouden perusarvo sekä ulkopuolisten kuormien vaikutukset pilareiden taipumaan vaikuttavat asiaan. Näistä seikoista itse pidän liittovaikutuksen merkitystä kaikkein suurimpana. Jos esimerkiksi jopa hieman pessimistisesti oletetaan, että liittovaikutus pienentää todellista taipumaa

10 prosenttia, tarkoittaa tämä sitä, että suurin kiertymä pienenee samaiset 10 prosenttia. Karkeasti sanottuna tämä riittää lähes tapauksessa kuin tapauksessa poistamaan liiallisen kiertymän aiheuttamat vaakakomponentit liitoksesta tai vähintäänkin pienentää niitä huomattavasti.

On täysin väärin perustaa tietty menetelmä oletukseen siitä, että asiaan merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ei tarvitse ottaa huomioon siitä huolimatta, että näiden tekijöiden vaikutus voi mahdollisesti olla erittäin negatiivinen. On perusteltua tehdä yksinkertaisuuksia, joiden vaikutus on varmalla puolella, eikä voi missään olosuhteissa aiheuttaa alimitoituksen riskiä. On kaikissa olosuhteissa huomattavasti parempi mallintaa erilaiset ilmiöt edes karkealla tasolla, mutta kuitenkin niin, että yksinkertaistukset eivät luo alimitoituksen riskiä.

Vaikka käytännön esimerkein voitaisiin todentaa, ettei mitoituksen suhteen olla tehty vääriä oletuksia ja mitoitettut rakenteet ovat osoittautuneet kestäviksi, täytyisi mielestäni tämän lisäksi kyetä osoittamaan oletuksien oikeellisuuden syyt ja perusteet. Esimerkiksi kannakelevyliitoksen kestävyysmitoittaminen pelkälle leikkausvoimalle on osoitettu toimivaksi menetelmäksi. Voin kuitenkin esittää epäilyni siitä, liittyykö kestävyys todellisuudessa liitoksen nimellisestä äärettömänä pidettyyn kykyyn kiertyä, vaiko kenties suuriin osavarmuuskertoimiin, jotka liitoksien mitoittamiseen yleisesti liittyvät. Esimerkiksi pulttiliitoksen leikkauskestävyydeksi oletetaan parhaimmassakin tapauksessa vain 80 prosenttia teoreettisesta leikkauskestävyydestä. Kun tähän lisätään vielä kuormien osavarmuuskertoimet, puhutaan enää noin 50–70 prosentin suuruusluokasta. Näin suuriin osavarmuuskertoimiin tosiaan mahtuukin muutama virhe laskelmissa ja villimpi oletus. Tämä ei mielestäni kuitenkaan oikeuta perusteettomia oletuksia.

9 Pohdintaa

Tämän insinööri työn tärkeimpänä tuloksena voidaan ehdottomasti pitää WQ-ulokepalkkilaskuria. Työn kirjallista osuutta aloitettaessani annoin sille kaksi tärkeintä vaatimusta, joiden puitteissa se tuli toteuttaa. Toisena pääteemana voidaan pitää WQ-palkkeja käsittelevän osan käyttökelpoisuus WQ-ulokepalkkilaskurin käyttöä tukevana käsikirjana, josta on helppoa hakea tietoa laskurin mitoitusperiaatteesta. Toisena teemana työn kirjalliselle osalle oli se, että käsiteltävät asiat olisi esitetty riittävän pieniksi paloiksi purettuna, jotta kulloisenkin laskentaperiaatteen takana oleva teoria olisi mahdollisimman helppoa sisäistää. Usein lähde- tai opiskelumateriaalina toimivat teokset ovat luonteeltaan sellaisia, että mikäli olet jo valmiiksi aiheen asiantuntija, ymmärrät asian, mutta et hyödy tai saa mitään uutta dokumentin sisällöstä. Aihetta opiskelemaan aloittaneen on usein vaikeaa, ellei mahdotonta saada ideasta kiinni, sillä ymmärtämisen kannalta avainasemassa olevia asioita pidetään usein liian itsestään selvinä.

Suurena osana tätä työtä voidaan pitää vertailua, jossa taipuma tarkasteltiin käyttäen FEM-ohjelmaa, tai teräksen lämpötilojen vertailua TRY:n käyrien ja laskurin tuloksien välillä. Näillä osioilla ei välttämättä ole suurta arvoa WQ-palkkilaskurin käyttäjän näkökulmasta, ellei sitten vertailu tuo tuloksille luotettavuutta. Tuloksia esiteltäessä esitettiin näkökulma siitä, kuinka eksaktisti teräksen lämpötilannousu todellisuudessa voidaan mallintaa, minkä perusteella karkeasti +-40 celsiusasteen tarkkuus on jo erittäin hyvä tarkkuus. Tämän näkemyksen valossa esitelty tarkempi laskenta olisi turha. Olen kuitenkin sitä mieltä, että lämmön siirtyminen teräkseen on erinomaisen eksaktia tiedettä ja se voidaan mallintaa tarkasti. Epävarmuus liittyykin palotilanteen mallinnukseen sekä käytettyihin palosuojamateriaaleihin. Teräksen ominaislämpökapasiteetti on kuitenkin suure, joka tunnetaan tarkasti. Siksi mielestäni tätä ei tulisi yksinkertaistaa. Lisäksi katson kuitenkin tehdyn vertailun ja tutkimuksen olevan suuressa arvossa sille, ken mielihän jatkaa aiheen tiimoilla tutkimuksen tekemistä. Sama pätee myös pultiliitoksen mitoitus-ta koskevaa osiota.

9.1 Parannusehdotukset

Työtä tehtäessä tulikin havainneeksi, että teräsrakenneyhdistyksen hyväksymiä, voimassa olevia varmennettuja käyttöselosteita erilaisille palosuojamateriaaleille on hyvin vähän. Suunnittelijan näkökulmasta ajatellen olisi suotavaa, että käyttöselosteita olisi

voimassa ja näistä löytyisi tarvittavaa tietoa vaivattomasti. Seuraavaksi esittelen muutamia parannusehdotuksia ja seikkoja, joita tulee vielä kehittää lisää.

9.1.1 Epäsymmetrisen reunapalkin jäyhyysmomentin tarkempi laskenta

Itse laskentapohjaa ajatellen kehitysehdotuksena pinnalle nousee WQ-palkin jäyhyysmomenttiin liittyvä seikka. Mikäli tarkasteltava poikkileikkaus ei ole yhdenkään pääjäyhyysakselin suhteen symmetrinen, ei jäyhyysmomentin laskemiseksi voida soveltaa tutuksi tulleita menetelmiä. Esimerkiksi reunapalkin tapauksessa täytyy jäyhyysmomentin laskemiseksi määritellä poikkileikkauksen vääntökeskiö, jonka voidaan ajatella edustavan sitä pistettä, minkä ympäri epäsymmetrinen poikkileikkaus alkaa kiertyä. Voidaankin ajatella, että poikkileikkaus kiertyy sen eri suuntien jäyhyyksien suhteessa siten, että poikkileikkauksen painopisteen yläpuolelle jää yhtä paljon jäyhyyttä kun alapuolelle. Laskenta edellyttää niin sanotun jäyhyysmatriisin laskemista, tai vähintään jäyhyyden laskemisen pääjäyhyysakseleiden suhteen. WQ-ulokepalkkilaskuria ajatellen voidaan todeta, että edellä mainittujen seikkojen huomiotta jättäminen on varmalla puolella oleva oletamus.

9.1.2 Ontelolaatan pään kestävyys

Eräs huomionarvoinen seikka WQ-palkkia mitoittaessa liittyy itse palkkiin tukeutuvien ontelolaattojen kestävyys. Mikäli palkki oman kestävyytensä puitteissa toimii moitteettomasti, voi kuitenkin taipuma kyseisellä palkilla olla sellainen, ettei ontelolaatan pää kestä y -akselin suuntaista leikkausjännitystä. Mikäli ontelolaattojen päälle tulee pintavalu, lisää pintavalun ja ontelolaatan välinen liittovaikutus ontelolaatan pään jännityksiä merkittävästi. Ongelma voidaan ratkaista raudoittamalla pintalaatta ja käyttämällä ontelolaatan päiden täyttöä, mutta ontelolaatan lopullinen mitoitus kuuluu punostajalle. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa WQ-palkin mitoittajan tulisi pystyä suunnittelemaan palkki siten, että punostajalle jää riittävä pelivara ontelolaattojen mitoitukselle. Tästä syystä olisikin otollista, mikäli WQ-ulokepalkkilaskuri voisi tarkistaa WQ-palkin mitoituksen yhteydessä myös ontelolaatan pään käyttöasteen.

9.2 Tulevaisuudennäkymiä

Tämän insinööriyön laatimisen yhteydessä syntyi toistakymmentä pienempää laskuria, joista ehkä merkittävimpanä voidaan pitää yksiaukkoisen WQ-palkin laskentatyökalua, joka soveltaa samoja laskentaperiaatteita kuin ulokepalkkilaskurikin. Toisena merkittävänä laskupohjana voitaneen pitää kehitysvaiheessa olevaa laskuria, joka ratkaisee epäsymmetrisen poikkileikkauksen jäyhyysmomenttiin liittyvät ongelmat. Laskupohja on suunniteltu laskemaan mielivaltaisen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti syötettyjen parametrien puitteissa. Valmistuttuaan laskupohja voisi toimia useiden laskentapohjien jäyhyysmomenttia käsittelevien osien ”laskentamoottorina”.

Lisäksi olen aloittanut ontelolaatan pään tarkastelua koskevien seikkojen alustavan tutkimisen. Osion toteuttamisen suurimpana haasteena voitaneen pitää ajanpuutetta, mutta yleensä laskupohjat ovatkin luonteeltaan sellaisia, että ne kehittyvät ja niitä kehitetään ajan myötä.

Lähteet

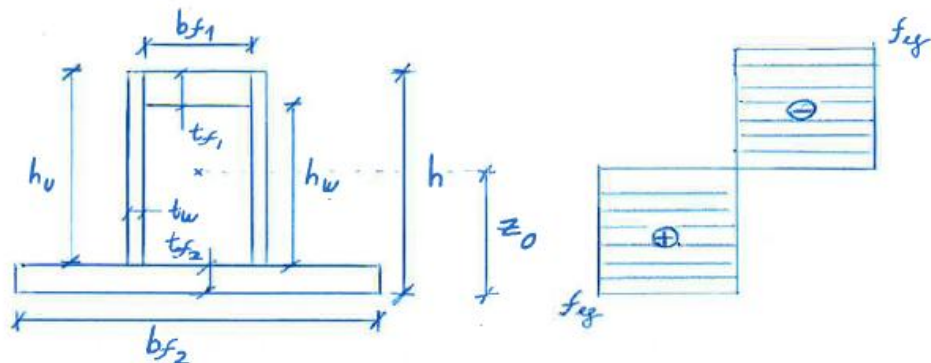
- 1 Teräsrakenneyhdistyksen teräsnormikortti numero 21
- 2 Ruukki Hitsatut Profiilit –Käsikirja 2010, Uudistettu kolmas painos, Otavan kirjapaino Oy, Keuruu 2010
- 3 SFS-EN-1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat
- 4 SFS-EN-1993-1-5 Teräsrakenteiden suunnittelu osa 5: Levyrakenteet
- 5 Ylinen Arvo, Kimmo- ja lujuusoppi I, toinen muuttamaton painos, Werner Söderström osakeyhtiö laakapaino, Porvoo 1976
- 6 Matti Lähteenmäen lujuusopin arkisto, http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/luj1_pdf/luku_9_k.pdf, luettu 20.9.2016
- 7 Eurokoodi1993-1-2 Teräsrakenteiden suunnittelu osa 2: Rakenteen palomitoitus
- 8 Britannian ensyklopedia, <https://www.britannia.com/science/curie-point>, luettu 10.9.2016
- 9 Teräsrakenneyhdistyksen verkkosivut, http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/264/dd82fd9/TRY_110_2011.pdf, Luettu 1.9.2016
- 10 Teräsrakenneyhdistyksen verkkosivut, http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/266/47cef21/TRY_116_2012.pdf, luettu 26.8.2016
- 11 Teräsrakenteiden suunnittelun oppikirja, Forssan kirjapaino Oy 2010
- 12 SFS-EN-1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu osa 8: Liitosten mitoitus

Plastisen tilan neutraaliakseli ja tasapainoisen poikkileikkauksen määrittäminen

RAMBOLL

Projekti PLASTISEN TILAN NEUTRAALIAKSELIN KORKEUS

Pvm 12.9.2016



$$f_{yg} \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_{yg} \cdot 2 t_w \cdot (z_0 - t_{f2}) = f_{yg} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1} + f_{yg} \cdot 2 t_w \cdot (h - z_0)$$

$$b_{f2} \cdot t_{f2} + 2 t_w \cdot z_0 - 2 t_w \cdot t_{f2} = b_{f1} \cdot t_{f1} + 2 t_w \cdot h - 2 t_w \cdot z_0$$

$$4 t_w z_0 = b_{f1} \cdot t_{f1} + 2 t_w \cdot h + 2 t_w \cdot t_{f2} - b_{f2} \cdot t_{f2}$$

$$z_0 = \frac{b_{f1} \cdot t_{f1} - b_{f2} \cdot t_{f2} + 2 t_w (h + t_{f2})}{4 t_w}$$

PLL1 RAJA, KUN $\alpha \geq 0,5 = \frac{396 E}{13\alpha - 1}$

$$\alpha = h_w \cdot \frac{z_0 - t_{f2}}{h_w}$$

MÄÄRÄTÄÄN, ETTÄ $t_{f1} = \frac{t_{f2} \cdot b_{f2}}{b_{f1} + 2 t_w} \rightarrow \alpha = 0,5$

$$\frac{396 E}{\frac{13}{2} - 1} = 396 E \cdot \frac{2}{11} = 72 E$$

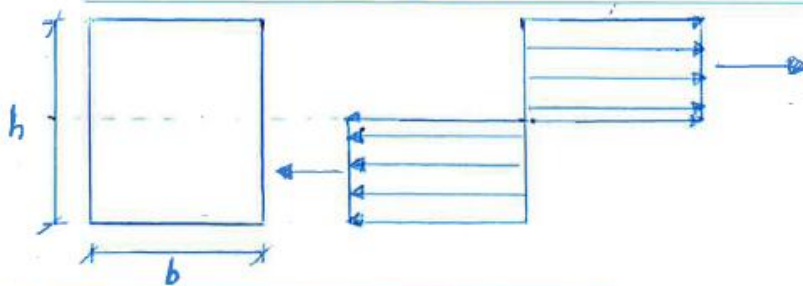
72 E ON TAIKUTETUN OSAN PLL1 RAJAOIKKUUS.

Plastinen taivutusvastus suorakaiteelle ja WQ-palkille

RAMBOLL

Projekti PLASTINEN TAIVUTUSVASTUS ERI
POIKKILEIKKAUKSILLE

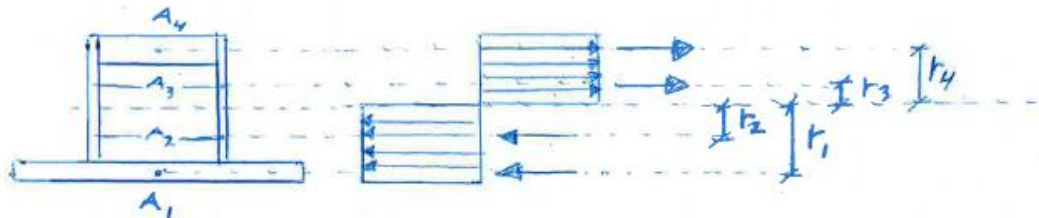
Pvm 15.9.2016



$$W_{pl} = b \frac{b}{2} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{2} + b \frac{b}{2} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{2}$$

$$W_{pl} = \frac{bh^2}{8} + \frac{bh^2}{8}$$

$$W_{pl} = \frac{bh^2}{4}$$

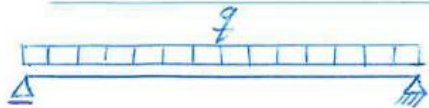


$$W_{pl} = \sum (A_i \cdot r_i)$$

Taipumaviivan lauseke ja taipumaviivan derivaatta

RAMBOLL

Projekti **TAIPUMAVIIIVAN LAUSEKE JA TAIPUMAVIIIVAN DERIVAATTA** Pvm 1.9.2016



$$A_y = B_y = \frac{qL}{2}$$

$$M(x) = \frac{qLx}{2} - \frac{qx^2}{2}$$

$$v'(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{qLx^2}{4} - \frac{qx^3}{6} + C_1 \right)$$

$$v(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{qLx^3}{12} - \frac{qx^4}{24} + C_1x + C_2 \right)$$

$$v(0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

$$v(L) = 0 \Rightarrow C_1 = -\frac{qL^3}{24}$$

$$v(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{qLx^3}{12} - \frac{qx^4}{24} - \frac{qL^3x}{24} \right)$$

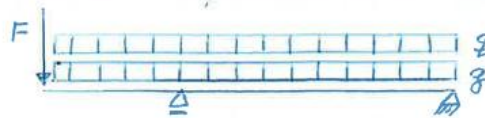
$$v'(x) = \left(\frac{qLx^2}{4} - \frac{qx^3}{6} - \frac{qL^3}{24} \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

Taipumaviivan differentiaaliyhtälöt ulokepalkille

RAMBOLL

Projekti: INSINÖÖRITYÖ, TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALI- Pvm 1.6
YHTÄLÖT ULKEPALKILLE 1/4

$$v''(x) = -\frac{M_x}{EI}$$

KUORMITUSYHDISTELY

① ONTELOLAATTOJEN ASENNUS, KENTTÄ-ULOKE

$$q_{on} + q_{ASENNUS} (0,5 \text{ kN/m}^2)$$

② SEINÄN ASENNUS

$$F_{SEINÄ}$$

③ PINTABETONI, KENTTÄ-ULOKE

$$q_{BET} + q_{ASENNUS} (0,5 \text{ kN/m}^2)$$

④ HYÖTYKUORMA JA LIKKUVA OSA, KENTTÄ-ULOKE

$$q_{HYÖTY}$$

JOHDETAAN LAUSEKE, JOKA MAHDOLLISTAA KAIKKI
TAPAUKSET JA VARIATIOT

TUKIRAJAKTIO B KAIKILIEN TAPAUKSIEN KAUSKA KONSISTENTIS-
SA MUODOSSA JOHDETAAN PISTEEN A KORKEUTTASAPAILO-
EHDOSTA:

$$B_y = \frac{q_2 \cdot L_2}{2} + \frac{q_2 \cdot L_2}{2} - \frac{q_1 \cdot L_1^2}{2 \cdot L_2} - \frac{q_1 \cdot L_1^2}{2 \cdot L_2} - \frac{F \cdot L_1}{L_2}$$

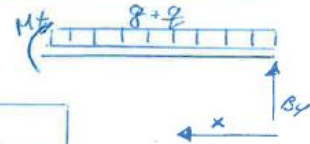
RAMBOLL

Projekti MSINÖÖRITYÖ, TAIPUMAVIIHAN DIFFERENTIAALI Pvm 1.6

VHTÄLÖT ULKOKERÄKILLE

2/4

KENTÄN TAIVUTUSMOMENTTIYHTÄLÖ:



$$M(x) = \frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x}{2} + \frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x}{2} - \frac{q_2 \cdot L_1^2 \cdot x}{2 \cdot L_2} - \frac{q_1 \cdot L_1^2 \cdot x}{2 \cdot L_2} -$$

$$\frac{F \cdot L_1 \cdot x}{L_2} - \frac{q_2 \cdot x^2}{2} - \frac{q_2 \cdot x^2}{2}$$

$$V'(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x^2}{4} + \frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x^2}{4} - \frac{q_2 \cdot L_1^2 \cdot x^2}{4 \cdot L_2} - \frac{q_1 \cdot L_1^2 \cdot x^2}{4 \cdot L_2} -$$

$$\frac{F \cdot L_1 \cdot x^2}{2 \cdot L_2} - \frac{q_2 \cdot x^3}{6} - \frac{q_2 \cdot x^3}{6} + C_1$$

$$V(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x^3}{12} + \frac{q_2 \cdot L_2 \cdot x^3}{12} - \frac{q_2 \cdot L_1^2 \cdot x^3}{12 \cdot L_2} - \frac{q_1 \cdot L_1^2 \cdot x^3}{12 \cdot L_2} -$$

$$\frac{F \cdot L_1 \cdot x^3}{6 \cdot L_2} - \frac{q_2 \cdot x^4}{24} - \frac{q_2 \cdot x^4}{24} + C_1 \cdot x + C_2$$

$$V_0 = 0 \quad V_{L_2} = 0$$

$$V_0 = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

$$C_1 = -\frac{q_2 \cdot L_2^3}{24} - \frac{q_2 \cdot L_2^3}{24} + \frac{q_2 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{q_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{F \cdot L_1 \cdot L_2}{6}$$

RAMBOLL

Projekti INSINÖÖRITYÖ, TAIPUMAVIIIVAN DIFFERENTI - Pvm 1.6

AALIJHTALÖT ULOKKEPALKILLA

3/4

$$v(L_2) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(-\frac{5 \cdot g_2 \cdot L_2^4}{384} - \frac{5 \cdot g_1 \cdot L_2^4}{384} + \frac{12 \cdot g_1 \cdot L_2^2 \cdot L_1^2}{384} + \frac{12 \cdot g_1 \cdot L_2^2 \cdot L_1^2}{384} + \frac{24 \cdot F \cdot L_1 \cdot L_2^2}{384} \right)$$

ULOKKEEN TAIPUMA:

$$M(x) = -F \cdot x - \frac{g_1 \cdot x^2}{2} - \frac{g_2 \cdot x^2}{2}$$

$$v_1'(x) = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{F \cdot x^2}{2} + \frac{g_1 \cdot x^3}{6} + \frac{g_2 \cdot x^3}{6} + C_3 \right)$$

$$v_2'(x) = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{F \cdot x^3}{6} + \frac{g_1 \cdot x^4}{24} + \frac{g_2 \cdot x^4}{24} + C_3 x + C_4 \right)$$

REUNAEHDOT:

KOSKA ULOKKEELLA ON VAIN YKSI TUKE, EI TAIPUMASTA SAADA ENNEN YKSI REUNAEHTO. JOUDUTAAN KÄYTTÄMÄÄN KESKÄN TAIPUMASTA JOHDETTUA TAIPUMAN ENSIMMÄISTÄ DERIVAATTAA $v'(L_2)$, SILLÄ JATKUVUUSEHDOSTA SAadaan

$$v_1'(L_2) = v_2'(L_2)$$

$$\frac{g_2 \cdot L_2^3}{4} + \frac{g_2 \cdot L_2^3}{4} - \frac{g_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2}{4 \cdot L_2} - \frac{g_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2}{4 \cdot L_2} - \frac{F \cdot L_1 \cdot L_2^2}{2 \cdot L_2} - \frac{g_2 \cdot L_2^3}{6} =$$

$$\frac{g_2 \cdot L_2^3}{6} - \frac{g_2 \cdot L_2^3}{24} - \frac{g_2 \cdot L_2^3}{24} + \frac{g_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{g_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{12} + \frac{F \cdot L_1 \cdot L_2}{6} =$$

$$\frac{F \cdot L_1^2}{2} + \frac{g_1 \cdot L_1}{6} + \frac{g_2 \cdot L_1^3}{6} + C_3$$

RAMBOLL

Projekti INSINÖÖRITVÖ, TAIPUMAVIIHAN DIFFERENTIAALI - Pvm 1.6
VÄRILÖT ULOKKEPALKILLE 9/4

$$C_3 = \frac{\rho_2 \cdot L_2^3}{24} + \frac{q_2 \cdot L_2^3}{24} - \frac{q_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{6} - \frac{\rho_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2}{6} - \frac{F \cdot L_1 \cdot L_2}{3} - \frac{F \cdot L_1^2}{2}$$

$$- \frac{q_1 \cdot L_1^3}{6} - \frac{\rho_1 \cdot L_1^3}{6}$$

$U_2(L_1) = 0$

$$- \frac{F \cdot L_1^3}{3} - \frac{\rho_1 \cdot L_1^4}{8} - \frac{q_1 \cdot L_1^4}{8} + \frac{\rho_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24} + \frac{q_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24} - \frac{q_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6} -$$

$$\frac{\rho_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6} - \frac{F \cdot L_1^2 \cdot L_2}{3} + C_4 = 0$$

$$C_4 = \frac{F \cdot L_1^3}{3} + \frac{\rho_1 \cdot L_1^4}{8} + \frac{q_1 \cdot L_1^4}{8} - \frac{\rho_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24} - \frac{q_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24} +$$

$$\frac{q_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6} + \frac{\rho_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6} + \frac{F \cdot L_1^2 \cdot L_2}{3}$$

ULOKKEEN TAIPUMA:

$$U_{2(0)} = \frac{F \cdot L_1^3}{3} + \frac{F \cdot L_1^2 \cdot L_2}{3} + \frac{\rho_1 \cdot L_1^4}{8} + \frac{q_1 \cdot L_1^4}{8} - \frac{\rho_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24} - \frac{q_2 \cdot L_2^3 \cdot L_1}{24}$$

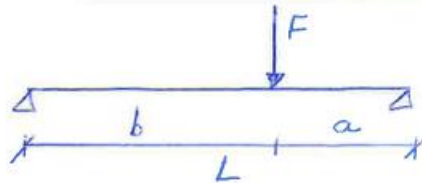
$$+ \frac{q_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6} + \frac{\rho_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2}{6}$$

RAMBOLL

Projekti

Pvm 4.8.2016

PALKIN TAIPUMAVIVAN DIFFERENTIALIYHTÄLÖT TUO



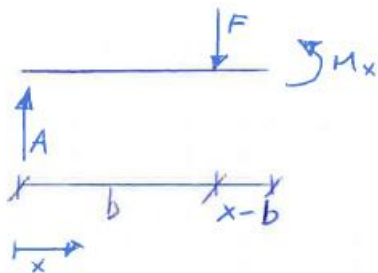
TUKIREAKTIOT

$$A = \frac{F \cdot a}{L} \quad B = \frac{F \cdot b}{L}$$



$$M_x = \frac{F \cdot a \cdot x}{L}$$

$$v(x) = \iint \frac{M(x)}{-EI} dx dx$$



$$M_x = \frac{F \cdot a \cdot x}{L} - F \cdot x + F \cdot b$$

$$v_1'(x) = \frac{F \cdot a \cdot x^2}{2L} + C_1$$

$$v(x) = \frac{F \cdot a \cdot x^3}{6L} + C_1 \cdot x + C_2$$

$$v_2'(x) = \frac{F \cdot a \cdot x^2}{2L} - \frac{F \cdot x^2}{2} + F \cdot b \cdot x + C_3$$

$$v_2(x) = \frac{F \cdot a \cdot x^3}{6L} - \frac{F \cdot x^3}{6} + \frac{F \cdot b \cdot x^2}{2} + C_3 \cdot x + C_4$$

RAMBOLL

Projekti

Pvm 4.8.2016

ALKIN TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALIVHTÄLÖT TUD

$$v(0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad v'(b) = v_2'(b)$$

$$v_2(L) = 0 \quad v(b) = v_2(b)$$

$$\frac{Fab^2}{2L} + C_1 = \frac{Fab^2}{2L} - \frac{Fb^2}{2} + \frac{Fb^2}{2} + C_3$$

$$C_1 = Fb^2 - \frac{Fb^2}{2} + C_3 \Rightarrow C_3 = C_1 + \frac{Fb^2}{2}$$

$$v_2(L) = 0 \Rightarrow \frac{FaL^3}{6L} - \frac{FL^3}{6} + \frac{FbL^2}{2} + C_1 - \frac{Fb^2L}{2} + C_4 = 0$$

$$\frac{Fab^3}{6L} + C_1 \cdot b = \frac{Fab^3}{6L} - \frac{Fb^3}{6} + \frac{Fb^3}{2} - \frac{Fb^3}{2} + C_1 \cdot b + C_4$$

YHTÄLÖPARI:

$$\begin{cases} \frac{FaL^2}{6} - \frac{FL^3}{6} + \frac{FbL^2}{2} - \frac{Fb^2L}{2} + C_1 \cdot L + C_4 = 0 \parallel \cdot 1 \\ C_4 - \frac{Fb^3}{6} = 0 \parallel \cdot -1 \end{cases}$$

$$C_1 \cdot L + \frac{Fb^3}{6} + \frac{FaL^2}{6} + \frac{FbL^2}{2} - \frac{FL^3}{6} - \frac{Fb^2L}{2} = 0$$

$$C_1 = \frac{Fb^2}{2} + \frac{FL^2}{6} - \frac{FbL}{2} - \frac{FaL}{6} - \frac{Fb^3}{6L}$$

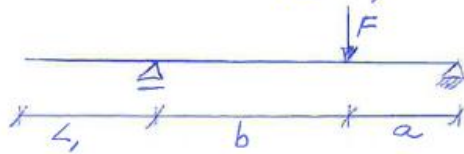
RAMBOLL

Projekti

Pvm 4.8.2016

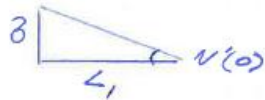
PALKIN TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALIYHTÄLÖT TUO

$$v(x) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{Fax^3}{6L} + \frac{Fb^2x}{2} + \frac{FL^2x}{6} - \frac{FbLx}{2} - \frac{FaLx}{6} - \frac{Fb^3x}{6L} \right)$$



$$v'(0) = \frac{Fb^2}{2} + \frac{FL^2}{6} - \frac{FbL}{2} - \frac{FaL}{6} - \frac{Fb^3}{6L}$$

TAIPUMA ULOKKEEN PÄÄSSÄ VOIDAAN LASKEA TUVAN A KIERTYMÄSTÄ



$$v'(0) \cdot L_1 = 3$$

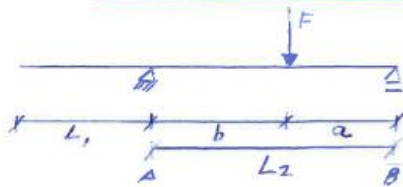
$$v_0 = 3 \cdot \frac{-1}{EI}$$

Pistevoiman vaikutus taipumaan, yhtälö käänteisestä suunnasta

RAMBOLL

Projekti PISTEVOIMAN OSUUS TAIPUMASTA
KÄÄNNEKÄSTÄ SUUNNASTA

Pvm 5.8.2016
TUO



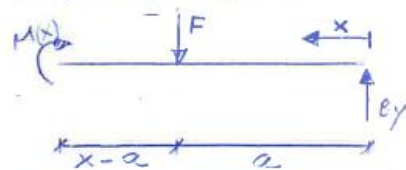
TUKIREAKTIO

$$B_y = \frac{F \cdot b}{L_2}$$

$$v(x) = \iint -\frac{M(x)}{EI} dx dx$$



$$M(x) = \frac{F b x}{L_2}$$



$$M(x) = \frac{F b x}{L_2} - F \cdot x + F \cdot a$$

$$v_1'(x) = \left(\frac{F b x^2}{2 L_2} + C_1 \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

$$v_1(x) = \left(\frac{F b x^3}{6 L_2} + C_1 \cdot x + C_2 \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

$$v_2'(x) = \left(\frac{F b x^2}{2 L_2} - \frac{F x^2}{2} + F a x + C_3 \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

$$v_2(x) = \left(\frac{F b x^3}{6 L_2} - \frac{F x^3}{6} + \frac{F a x^2}{2} + C_3 \cdot x + C_4 \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

REUNAHDOT

$$v_1'(0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0 \quad v_2'(L_2) = 0$$

$$v_1'(a) = v_2'(a) \quad v_1(a) = v_2(a)$$

RAMBOLL

Projekti PISTEYDÖIDÄN USUUS TAIFUMASTA
KÄÄNNETYSTÄ SUUNNASTA

Pvm 5.8.2016
TUO

$$\frac{Fb a^2}{2L_2} + C_1 = \frac{Fb a^2}{2L_2} - \frac{Fa^2}{2} + Fa^2 + C_3$$

$$\Rightarrow C_3 = C_1 - \frac{Fa^2}{2}$$

$$\frac{FbL_2^2}{6} - \frac{FL_2^3}{6} + \frac{FaL_2^2}{2} + C_1 \cdot L_2 - \frac{Fa^2L_2}{2} + C_4 = 0$$

$$\frac{Fba^3}{6L_2} + C_1 \cdot a = \frac{Fb a^3}{6L_2} - \frac{Fa^3}{6} + \frac{Fa^3}{2} + C_1 \cdot a - \frac{Fa^3}{2} + C_4$$

$$C_4 = \frac{Fa^3}{6}$$

$$\frac{FbL_2^2}{6} - \frac{FL_2^3}{6} + \frac{FaL_2^2}{2} - \frac{Fa^2L_2}{2} + \frac{Fa^3}{6} + C_1 \cdot L_2 = 0$$

$$C_1 = \frac{FL_2^2}{6} + \frac{Fa^2}{2} - \frac{FbL_2}{6} - \frac{FaL_2}{2} - \frac{Fa^3}{6L_2}$$

$$C_3 = \frac{FL_2^2}{6} - \frac{FbL_2}{6} - \frac{FaL_2}{2} - \frac{Fa^3}{6L_2}$$

$$C_4 = \frac{Fa^3}{6}$$

$$\left[0 \leq x < a \right] v(x) = \left(\frac{Fbx^3}{6L_2} + \frac{FL_2^2x}{6} + \frac{Fa^2x}{2} - \frac{FbL_2x}{6} - \frac{FaL_2x}{2} - \frac{Fa^3x}{6L_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{EI} \right)$$

$$\left[a \leq x < L_2 \right] v(x) = \left(\frac{Fbx^3}{6L_2} - \frac{Fx^3}{6} + \frac{Fax^2}{2} + \frac{FL_2^2x}{6} - \frac{FbL_2x}{6} - \frac{FaL_2x}{2} - \frac{Fa^3x}{6L_2} + \frac{Fa^3}{6} \right) \cdot \left(-\frac{1}{EI} \right)$$

Taipumaviiva yhdessä kuvaajassa WQ- palkin kentän ja ulokkeen osalta

RAMBOLL

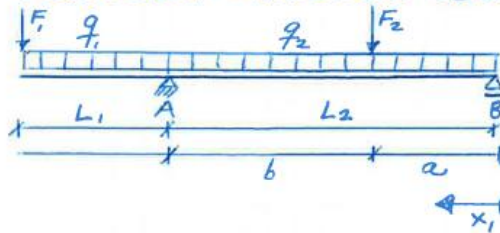
Projekti

Pvm 24.8

TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALIYHTÄLÖT: YKSI KUVAAJA

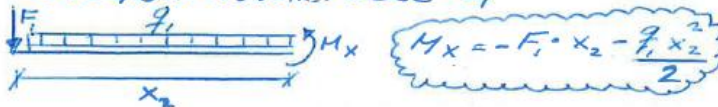
JOTTA TAIPUMAVIIVA VOIDAAN PIIRTÄÄ JATKUVANA YHTEEN KUVAAJAAN ESIMERKIKSI MATHCADISSA, TARVITAAN LAUSEKKEET KENTÄN- SEKÄ ULOKKEEN TAIPUMILLE, JOITA OMAAVAT SAMASSA KOORDINAATISTOSSA YHTEISEN MUUTTUJAN. KOSKA TAIPUMAVIIVAN YHTÄLÖN MUOOSTAMISEN KÄDEN EPÄJATKUVUUS KOHDAN YLI SAMAN KOORDINAATISTOON ON VERRATTAIN HAASTAVAA, MUOOSTETAAN KUVAINOSYHTÄLÖ KÄDEN ERI KOORDINAATISTON MUUTTUJEN VÄLILLE.

KUTEN AIKAISEMISTA LASKELMISTA VOIDAAN TODETAA, EDellä KUVATUN RAKENNEMALLIN HUKAINEN KIERTYMÄ TUELLA A VOIDAAN JOHTAA TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALIYHTÄLÖISTÄ, JA SE ON YLEISESSÄ MUODOSSA SEURAAVA:



$$N_1'(A) = -\frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{q_2 L_2^3}{24} - \frac{q_1 L_1 L_2^2}{6} - \frac{F_1 L_1 L_2}{3} + \frac{F_2 b L_2}{3} - \frac{F_2 L_2^2}{3} + \frac{F_2 a L_2}{2} - \frac{F_2 a^3}{6 L_2} \right)$$

SEURAAVAKSI VOIDAAN LAUSUA ULOKKEEN TAIPUMAVIIVAN YHTÄLÖ ULOKKEEN PÄÄSTÄ OIKKALLE, KÄYTTÄEN TUEN A KIERTYMÄÄ REUNAehtona INTEGROIMISVAKIOLE C1



$$M_x = -F_1 \cdot x_2 - \frac{q_1}{2} x_2^2$$

$$U(x) = \iint -\frac{M_x}{EI} dx dx$$

RAMBOLL

Projekti

Pvm

TAIPUMAVIIVAN DIFFERENTIAALIVHTÄLÖT: YKSI KUVAAJA

$$v_2'(x_2) = -\frac{1}{EI} \left(-\frac{F_1 x_2^2}{2} - \frac{q_1 x_2^3}{6} + C_1 \right)$$

$$v_2(x) = -\frac{1}{EI} \left(-\frac{F_1 x_2^3}{6} - \frac{q_1 x_2^4}{24} + C_1 \cdot x_2 + C_2 \right)$$

REUNA-EHDOT $v_2(L_1) = 0$ $v_2'(L_1) = -v_1'(L_2)$

HUOMIONARVOISTA ON SE, ETTÄ KENTÄN TAIPUMAVIIVAN DERIVAATTA ON ULOKKEEN TAIPUMAVIIVAN DERIVAATAN KAUSKA TUELLA A YHTÄSUURI. TÄMÄ ON TRIVIAALIA, MUTTA JOTTA EHTO OLISI KONSISTENTTI VÄLITSEVIEN KOORDINAATISTO MUUTOSTEN KAUSKA, ON HUOMIOITAVA KIERTYMÄN POSITIIVISET SUUNNAT.

$$C_1 = \frac{F_1 L_1^2}{2} + \frac{q_1 L_1^3}{6} - \frac{q_2 L_2^3}{24} + \frac{q_1 L_1^2 L_2}{6} + \frac{F_1 L_1 L_2}{3} - \frac{F_2 b L_2}{3} + \frac{F_2 L_2^2}{3} - \frac{F_2 a L_2}{2} + \frac{F_2 a^3}{6 L_2}$$

$$C_2 = -\frac{F_1 L_1^3}{3} - \frac{q_1 L_1^4}{8} + \frac{q_2 L_1 L_2^3}{24} - \frac{q_1 L_1^3 L_2}{6} - \frac{F_1 L_1^2 L_2}{3} + \frac{F_2 b L_2 L_1}{3} - \frac{F_2 L_2^2 L_1}{3} + \frac{F_2 a L_2 L_1}{2} - \frac{F_2 a^3 L_1}{6 L_2}$$

$$v_2(x_2) = -\frac{1}{EI} \left(-\frac{F_1 x_2^3}{6} - \frac{q_1 x_2^4}{24} + C_1 \cdot x_2 + C_2 \right)$$

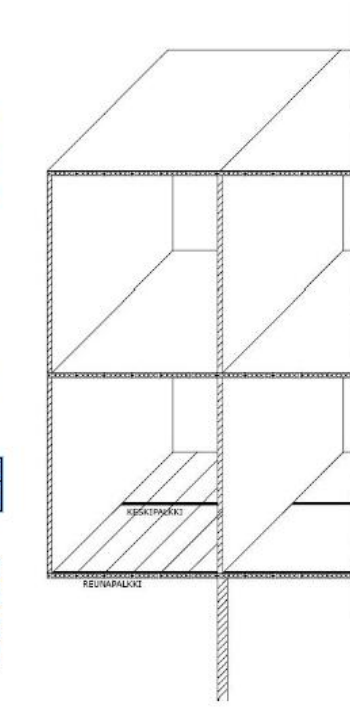
KOORDINAATISTON MUUTOSYHTÄLÖ: $x_2 = (L_2 + L_1) - x$

$$v_2(x) = -\frac{1}{EI} \left(-\frac{F_1 \cdot ((L_2 + L_1) - x)^3}{6} - \frac{q_1 \cdot ((L_2 + L_1) - x)^4}{24} + C_1 \cdot ((L_2 + L_1) - x) + C_2 \right)$$

WQ-ulokepalkkilaskurin raportti

ULOKEPALKIN VOIMASUUREET

- ONTELOLAATAN PAINO: $g_{\text{ont}} = 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- PINTABETONIN PAINO: $g_{\text{bet}} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
- PINTABETONIN PAKSUUS: $h_{\text{bet}} = 100\text{mm}$
- HYÖTYKUORMA: $q_{\text{hyö}} = 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- ULOKKEEN PITUUS: $L_1 = 3\text{m}$
- KENTÄN PITUUS: $L_2 = 6\text{m}$
- ONTELOLAATAN JÄNNEVÄLI 1: (REUNA) $b_{\text{laati1}} = 12\text{m}$
- ONTELOLAATAN JÄNNEVÄLI 2: (KESKI) $b_{\text{laati2}} = 8\text{m}$
- SEINÄN PAINO ULOKKEEN PÄÄSSÄ: $g_{\text{seinä}} = 1.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- SEINÄN KORKEUS: $h_{\text{seinä}} = 3\text{m}$
- SEINÄN PAINO WQ PALKIN PÄÄLLÄ: $g_{\text{seinä2}} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- ONTELOLAATTOJEN SUUNTAINEN SEINÄ: $g_{\text{seinä3}} = 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- SEINÄN ETÄISYYS ULOKKEETTOMASTA PÄÄSTÄ PALKKIA: $b_{F,2} = 3\text{m}$
- ONTELOLAATTOJEN SUUNTAISEN SEINÄN PITUUS: $L_{\text{seinä3}} = 5\text{m}$
- KERROSTEN LUKUMÄÄRÄ: $n_{\text{kr}} = 3$
- SEINÄ PALKIN PÄÄLLÄ: $s_{\text{seinä}} = 1$
- SEINÄ KENTÄSSÄ/ULOKKEELLA KOKO PALKILLA: $s_{\text{seinä2}} = 3$
- PALKIN SIJAINTI: $P_{\text{alkki}} = 2$
- PALOLUOKKA: $R60$



TUO

kuorma, vääntö := -20 $\frac{\text{kN}}{\text{m}}$

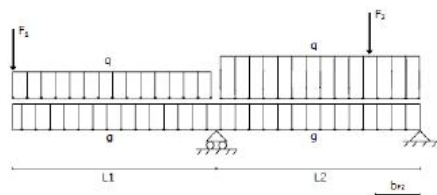
Laske tähän laataston ja palkin päällä mahdollisesti epäkeskisesti sijaitsevien seinien vääntöä aiheuttava kuorma Huom! Pienempi kenttä tasapainoittaa suurempaa, huomio siis tähän vain vääntöä lisäävät kuormat

S_{ens} , Ei seinää = 0 Seinä palkin päällä = 1

Jos seinä palkin ulokkeen päällä, $S_{\text{seinä2}} = 1$
 Jos seinä palkin kentän päällä, $S_{\text{seinä2}} = 2$
 Jos seinä koko palkin päällä, $S_{\text{seinä2}} = 3$

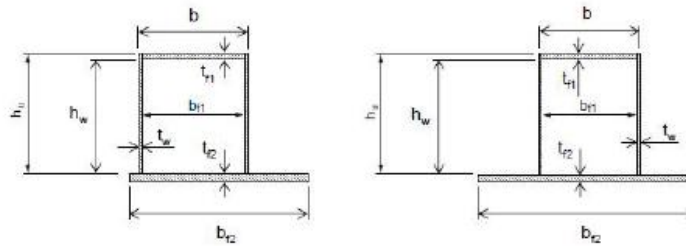
REUNAPALKKI=1, KESKIPALKKI=2

$K_{F1} = 1.0$ $\psi_{2,1} = 0.3$



WQ-PALKIN MITAT:

TUO



UUMAN KORKEUS:

$$h_u := 320 \text{ mm}$$

UUMAN PAKSUUS:

$$t_w := 6 \text{ mm}$$

YLÄLAIPAN LEVEYS:

$$b_{f1} := 238 \text{ mm}$$

YLÄLAIPAN PAKSUUS:

$$t_{f1} := 25 \text{ mm}$$

ALALAIPAN PAKSUUS:

$$t_{f2} := 15 \text{ mm}$$

ALALAIPAN LEVEYS:

$$b_{f2} := 470 \text{ mm}$$

SAUMAVALUN PAKSUUS:

$$b_j := 40 \text{ mm}$$

TUKIPINNAN LEVEYS:

$$d := 90 \text{ mm}$$

TERÄKSEN LUJUUSLUOKKA:

$$f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

UUMAN JÄYKISTEIDEN VÄLINEN SUURIN ETÄISYYS:

$$a := L_1$$

(L₁, jos vain päätylevyt jäykisteinä)

REUNAPALKIN KUORMITTAMATTOMAN LAIPAN LEVEYS:

$$r_1 := 0 \text{ mm}$$

(0mm, jos keskipalkki)

PALKIN TASAPAINOISUUS:

$$\frac{b_{f1} \cdot t_{f1}}{b_{f2} \cdot t_{f2}} = 0.844$$

~0.7-1.0 = TASAPAINOSSA

KOTELON LEVEYS:

$$b := b_{f1} + 2t_w = 250 \text{ mm}$$

WQ-PALKIN KORKEUS:

$$h := h_u + t_{f2} = 335 \text{ mm}$$

ALALAIPAN LEVEYS UUMASTA MITATTUNA:

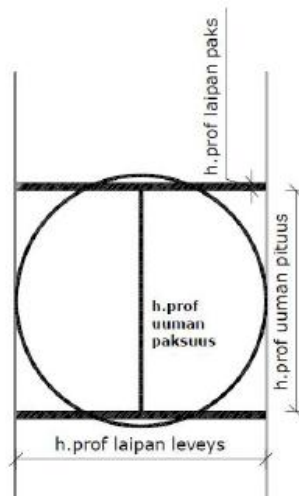
$$b_1 := \frac{b_{f2} - b}{P_{\text{alkki}}} - r_1 = 110 \text{ mm}$$

EPÄKESKISYYS (ONTELOLAATASTO):

$$e_1 := b_j + \left(\frac{d}{2}\right) = 85 \text{ mm}$$

WQ-PALKIN SISÄINEN HPALKKI PILARIN KOHDALLA:

TUO



H-PROFIILIN UUMAN PITUUS:	$h_{h_prof} := 500\text{mm}$
H-PROFIILIN UUMAN PAKSUUS:	$t_{w.h_prof} := 6\text{mm}$
H-PROFIILIN LAIPAN PAKSUUS:	$t_{f.h_prof} := 12\text{mm}$
BETONIN TEHOLLISUUDESTA HUOMIOIDAAN:	$P_{unst}\% := 10\%$
BETONIN LUJUUSLUOKKA:	C40/50
H-PROFIILIN LAIPAN LEVEYS:	$b_{h_prof} := b_{f1} - 4\text{mm}$
H-PROFIILIN KORKEUS PILARIN SUUNNASSA:	$h_{profkork} := h - t_{f1} - t_{f2} - 2\text{mm} = 293\text{mm}$

ke syys 07 10:56:53 2016

OHJELMA LASKEE NORMAALIVOIMAN ERI KERROKSISTA IDENTTISTEN LAATASTOJEN MUKAAN. MIKÄLI HALUAT KORJATA NORMAALIVOIMAN ARVOA, SYÖTÄ NORMAALIVOIMAN ARVO KÄSIN.

$$N_{Ed,oma} := 3500\text{kN}$$

LASKENTAPOHJAN ARVO

TUO

- 📄 KRT/MRT-KUORMAT - ke syys 14 19:22:26 2016
- 📄 MOMENTTI, LEIKKAUSVOIMA JA NORMAALIVOIMA KRIITISESSÄ PISTEESSÄ - ma syys 12 13:59:19 2016
- 📄 POIKKILEIKKAUSLUOKKA - ma syys 19 15:50:02 2016
- 📄 POIKKILEIKKAUSLUOKAN 4 TEHOLLISET MITAT - ma syys 19 16:23:09 2016
- 📄 LAIPAN KUORMITUS JA POIKITTAINEN TAIVUTUS - ma syys 26 18:55:50 2016
- 📄 TAIVUTUSVASTUS JA JÄYHYYSMOMENTTI - ma syys 26 18:55:44 2016
- 📄 PLASTINEN LEIKKAUSVOIMAKESTÄVYYS - ke syys 07 10:54:07 2016
- 📄 VÄÄNTÖ JA VÄÄNNÖN AIHEUTTAMA LISÄLEIKKAUSVOIMA - ma syys 26 18:55:36 2016
- 📄 LEIKKAUSLOMMAHDUKSEN VAIKUTUS LEIKKAUSKESTÄVYYTEEN - pe syys 09 11:41:27 2016
- 📄 KRIITISEN PISTEEN KÄYTTÖRAJATILAN JÄNNITYKSET (VON MISES) - ma syys 26 18:55:29 2016
- 📄 TAIVUTUKSEN, LEIKKAUSVOIMAN, POIKITTAISEN TAIVUTUKSEN JA VÄÄNNÖN YHTEISVAIKUTUS TAIVUTUSKESTÄVYYTEEN - to syys 22 13:28:25 2016
- 📄 KRIITISEN PISTEEN PURISTUSKESTÄVYYS - pe syys 09 11:41:50 2016

$$I_{y,wq,el} = 35500 \text{ cm}^4$$

$$I_{y,wq,PLL4} = 35500 \text{ cm}^4$$

$$W_{wq} = 1994 \text{ cm}^3$$

$$W_{PLL4} = 1994 \text{ cm}^3$$

$$W_{wq,pl} = 2341 \text{ cm}^3$$

$$M_{el,Rd} = 708 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{PLL4,Rd} = 708 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{pl,Rd} = 831 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$V_{pl,Rd} = 841 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = 866 \text{ kN}$$

$$T_{Rd} = 174 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

POIKKILEIKKAUSLUOKKA

ALALAIPAN_PLL = "PLL1"

UUMA_PLL = "PLL2"

YLALAIPAN_PLL = "PLL1"

KOKO_PLL = "PLL2"

PURISTETUN_LAIPAN_LOMMAHDUS = "UUMA TUKEE LAIPPAA, OK!"

MITOITAVAT MOMENTIT KESKI- JA REUNAPALKILLE

$$M_{y,Ed} = 737 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

MITOITAVA LEIKKAUSVOIMA KRIITISELLÄ TUELLA

$$V_{Ed} = 588 \text{ kN}$$

LAIPAN KUORMITUS (AIHEUTTAA VÄÄNTÖÄ)

$$M_{p,Ed} = -4.92 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

PILARIN NORMAALIVOIMA KRIITISELLÄ TUELLA

$$N_{Ed} = 2997 \text{ kN}$$

$$q_{d,kenttä} = 136.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{1,d} = 41.4 \text{ kN}$$

$$q_{d,tuloke} = 136.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{2,d} = 34.5 \text{ kN}$$

$$q_{k,kenttä} = 106.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{1,k} = 36 \text{ kN}$$

$$q_{k,tuloke} = 106.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{2,k} = 30 \text{ kN}$$

POIKITTAISEN TAIVUTUKSEN VAIKUTUS MYÖTÖLJUUTEEN

TUO

$$M_{p,Ed} > 0.5 \cdot M_{p,pl,Rd}$$

POIKITTAINEN TAIVUTUS = "OK, Ei tarvitse huomioida taivutuksessa"

ALALAIPAN TAIVUTUSKESTÄVYYS

PLL1 JA PLL2

PLL3

$$M_{p,Ed} \leq M_{p,pl,Rd}$$

$$M_{p,Ed} \leq M_{p,el,Rd}$$

ALALAIPAN KESTÄVYYS = "OK"

ALALAIPAN_KA = 25.0%

LEIKKAUSLOMMAHDUKSEN HUOMIOON OTTAMINEN

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72c}{\eta}$$

Leikkauslommahdus = "OK, Ei tarvitse huomioida"

VÄÄNTÖKESTÄVYYS

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1.0$$

VÄÄNTÖKESTÄVYYS = "OK!"

VÄÄNNÖN_KA = 8.0%

LEIKKAUSKESTÄVYYS

LEIKKAUS

LEIKKAUS+LOMMAHDUS

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1.0$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1.0$$

LEIKKAUSKESTÄVYYS = "OK!"

LEIKKAUS_KA = 70.0%

TAIVUTUSKESTÄVYYS

$$\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{y,Rd}} \leq 1.0$$

LEIKKAUSVOIMAN VAIKUTUS = "HUOMIOIDAAN TAIVUTUSKESTÄVYYDESSÄ!"

TAIVUTUSKESTÄVYYS = "OK, KESTÄÄ TAIVUTUKSEN!"

TAIVUTUKSEN_KA = 90.0%

KRIITISEN PISTEEN PURISTUSKESTÄVYYS:

$$\frac{N_{Ed,s}}{N_{pl,Rd}} \leq 1.0$$

PURISTUSKESTÄVYYS = "OK, KESTÄÄ"

PURISTUKSEN_KA = 80.0%

YHTEISVAIKUTUS KRIITISESSÄ PISTEESSÄ

$$\frac{\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{y,Ed} + 3 \cdot \tau_{Ed}^2}}{355 \text{MPa}} \leq 1$$

YHTEISVAIKUTUKSEN MYÖTÖEHTO = "OK!"

YHTEISVAIKUTUKSEN_KA = 90.0%

TAIPUMAN TARKASTELU KÄYTTÖRAJATILASSA ERI KUORMITUSYHDISTELMILLE:

TUO

SEINÄN TILANNE ULOKKEEN PÄÄSSÄ:

SEINÄ ASENTAMATTA

ONTELOLAATTOJEN SUUNTAISEN SEINÄN TILANNE (PISTEVOIMA KENTÄSSÄ):

SEINÄ ASENTAMATTA

ULOKKEEN TILANNE:

LAATAT ASENNETTU

KENTÄN TILANNE:

LAATAT ASENTAMATTA

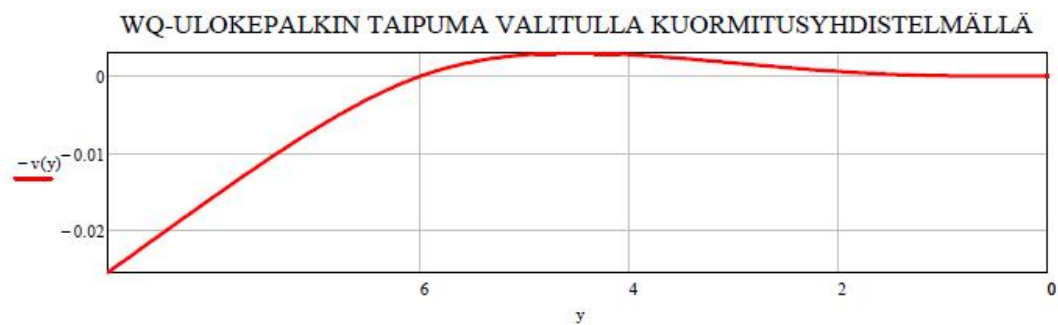
HYÖTYKUORMAN LIIKKUVAN OSAN SIJAINTI:

HYÖTYKUORMA KOKO PALKILLA

TAIPUMAN LASKENTA - to syys 08 11:49:08 2016

TAIPUMA_KENTÄSSÄ = 0.0233-mm TAIPUMA_ULOKKEELLA = 25.5285-mm

$$\frac{L_1 + L_2}{300} = 30\text{-mm}$$



TAIPUMA PYSYVISTÄ KUORMISTA

TAIPUMA_PYSYVÄT_KENTTÄ = 4.9701-mm

TAIPUMA_PYSYVÄT_ULOKKE = 19.3262-mm

TAAJUUS_KENTTÄ = 8.1-Hz

TAAJUUS_ULOKKE = 4.1-Hz

TUO

POIKKILEIKKAUSLUOKKA PALOTILANTEESSA - to syys 08 11:59:55 2016

PALOTILANTEEN KUORMAT - ke syys 14 19:58:52 2016

PALOLLE ALTTIIT OSAT A/V - ke syys 14 19:58:45 2016

TERÄKSEN LÄMPÖTILANKEHTYYS PLAOSUOJAAMATTOMANA - to syys 08 12:00:18 2016

POIKKILEIKKAUSLUOKKA PALOTILANTEESSA:

KOKO_PLL_PALO = "PLI2"

TERÄKSEN KRIITTINEN LÄMPÖTILA, KUN STABILITEETTIHILMIÖITÄ EI OTETA HUOMIOON:

KRIITTINEN_LÄMPÖTILA = 565 °C

PALOSUOJAMAALI:

Nullifire S707-60

NULLIFIRE S707-60 VOIMASSA 2.2.2017

PALOSUOJAMAALIN PAKSUUS μm

$$d_p = 1000 \cdot 10^{-6}$$

PALOSUOJARUISKUTE:

PROMASPRAY F250

PROMASPRAY F250 VOIMASSA 29.5.2017

PALOSUOJARUISKUTTEEN PAKSUUS m

$$d_1 = 0.01$$

SUOJAAMATTOMAN ALALAIPAN POIKKILEIKKAUSTEKIJÄ:

$$\frac{A_m}{V_m} = 71 \frac{1}{\text{m}}$$

PALOTILANTEEN MITOITTAVAT VOIMASUUREET:

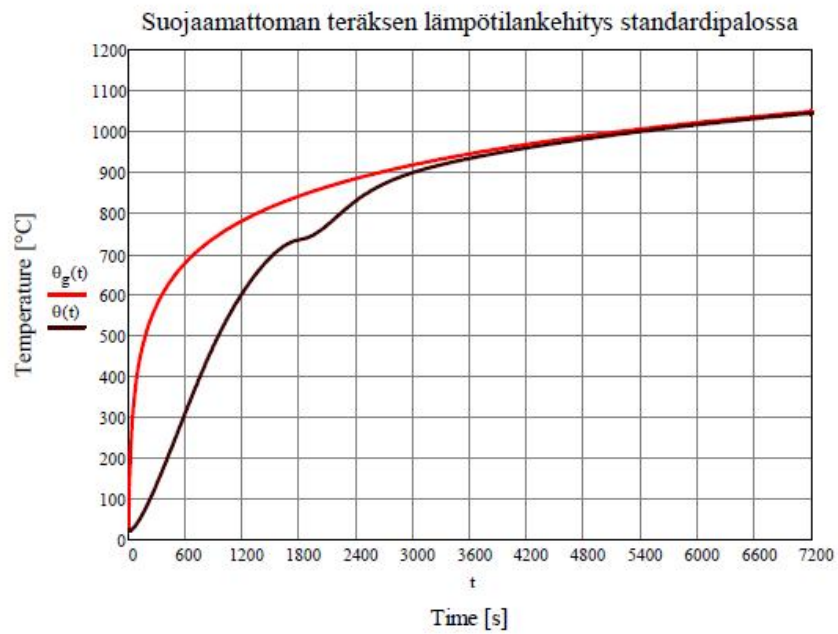
$$M_{y,Ed,palo} = 458 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$V_{Ed,palo} = 325 \text{ kN}$$

$$T_{R_a,palo} = 595 \text{ kN}$$

PALOTILANTEEN PYSYVIEN JA MUUTTUVIEN KUORMIEN SUHDE:

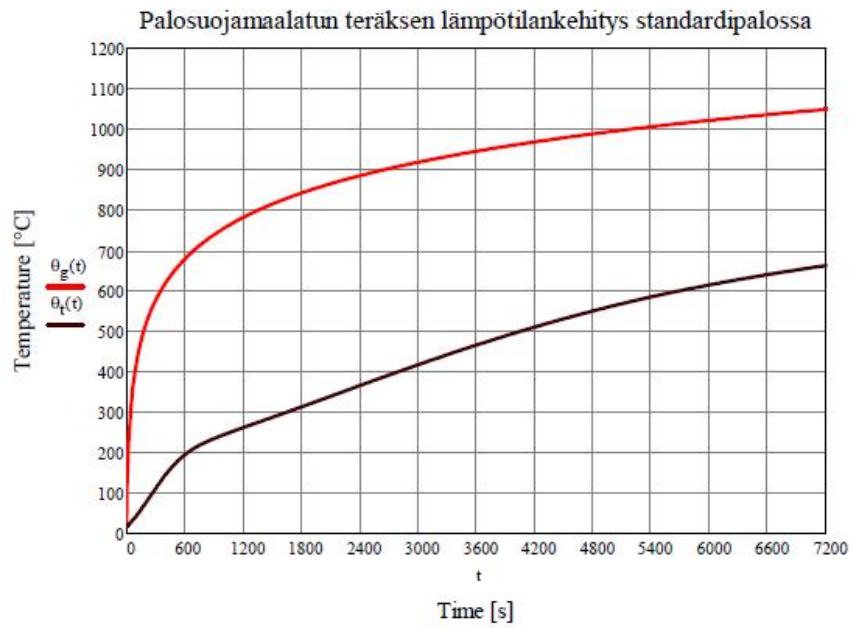
$$\mu_{0,fi} = 0.565$$



TERÄKSEN LÄMPÖTILA = 934.°C

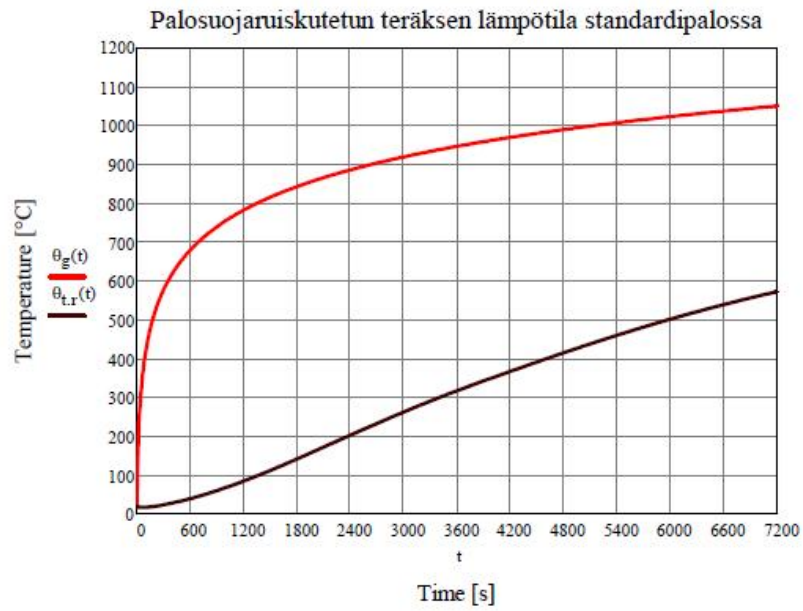
KRIITTINEN LÄMPÖTILA = 565.°C

TERÄKSEN PALONKESTO = "EI KESTÄ SUOJAAMATTOMANA PALOSUOJATTAVA!"



SUOJAMAALATUN TERÄKSEN LÄMPÖTILA = 465.°C KRIITTINEN LÄMPÖTILA = 565.°C

SUOJAMAALATUN TERÄKSEN PALONKESTO = "KESTÄÄ VALITUN PALONKESTOAJAN"



SUOJARUISKUTETUN TERÄKSEN LÄMPÖTILA = 317.°C

KRIITINEN LÄMPÖTILA = 565.°C

SUOJARUISKUTETUN TERÄKSEN PALONKESTO = "KESTÄÄ VALITUN PALONKESTOAJAN"

Kannakelevyliitoksen laskentaratortti

KORVAKKEET:

$b_{korvake} = 320\text{mm}$ $b_{korvake} = 160\text{mm}$ $b_{korvake} = 10\text{mm}$

PULTIT:

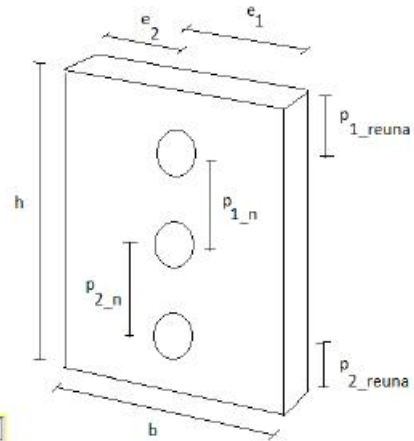
M24 8.8 KIIRTEET EI LEIKKAUSTASSOISSA

PULTTIEN LUKUMÄÄRÄ: 4

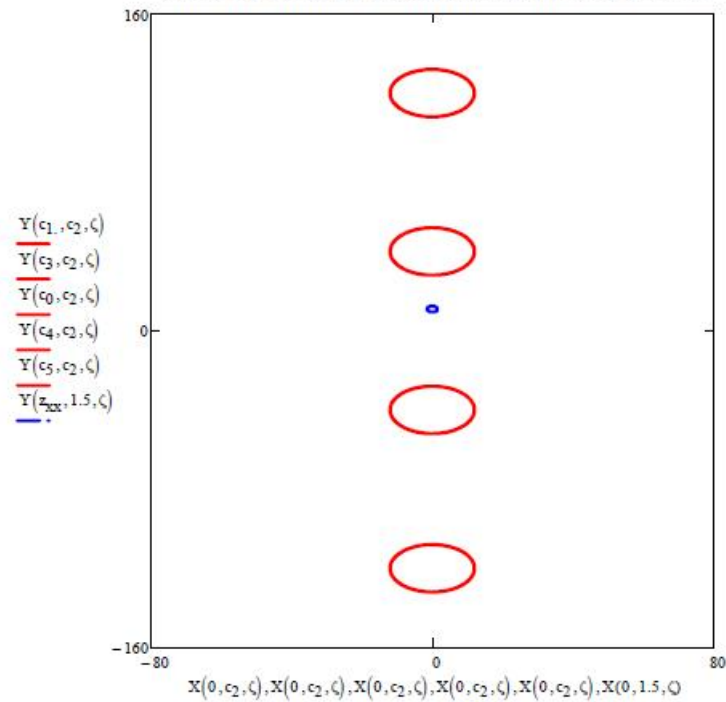
P1_1= 80mm P1_2= 80mm

P2_1= 80mm P2_2= 0mm

REIKIEN ETAISYYS PILARIN PUOLEISESTA REUNASTA(e.2) 80mm



PULTTIRYHMÄN SIJAINTI KANNAKELEVYSSÄ



KESKIOETAISYYS_p1_1 = "OK!"
 KESKIOETAISYYS_p1_2 = "OK!"
 KESKIOETAISYYS_p2_1 = "OK!"
 KESKIOETAISYYS_p2_2 = "OK!"

REUNAETAISYYS_e1 = "OK!"
 REUNAETAISYYS_e2 = "OK!"
 REUNAETAISYYS_p1_reuna = "OK!"
 REUNAETAISYYS_p2_reuna = "OK!"

PILARIN PROFIIILI, JOHON PALKKI LIITTYY:

TUO

LIITTOPILARI D20

PILARIN KERROSKORKEUS: $h_{\text{pilari}} := 4\text{m}$ LIITTOPILARIN TERÄSPROFIILIN PAKSUUS: $t_{\text{liittopilari}} := 10\text{mm}$

PILARIN JÄYKKYYS:

PILARIN PÄÄN KIERTYMÄ EPÄKESKISESTÄ LEIKKAUSVOIMASTA:

PULTIN LEIKKAUSKESTÄVYYS:

REUNAPURISTUSKESTÄVYYS:

PALAMURTUMISKESTÄVYYS:



JOTTA LIITOS OLISI TÄYSIN NIVELELLINEN, JA LIITOS VOITAIIN MITOITAA PELKÄLLE LEIKKAUSVOIMALLE, TÄYTY SEURAAVAN EHDON TÄYTTÄÄ:

$$\text{EHTO}_{1.1} := q_k \leq q_{\text{sall.1}} = 1$$

MIKÄLI EHTO EI TÄYTY, SIIRRYTÄÄN OSITTAIN JÄYKÄN LIITOKSEN MUKAISEEN LASKENTAMALLIIN. OSITTAIN JÄYKÄN LIITOKSEN TULEE KESTÄÄ KIERTYMÄÄ ELI MUODONMUUTOSTA VASTUSTAVAN VAAKAKOMPONENTIN JA LEIKKAUSVOIMAN MUODOSTAMAN RESULTANTIN SUURUISEN VOIMAN. VAAKAKOMPONENTTI EI KUITENKAAN VOI OLLA KANNAKELEVYN RUUVIN REIKIEN REUNAN MYÖTÄÄMISEEN TARVITTAVAA VOIMAA SUUREMPI.

$$\text{EHTO}_{2.1} := q_{\text{sall.1}} < q_k \leq q_{\text{sall.2}} = 0$$

$$\text{EHTO}_{2.2} := F_{\text{vaakakomp.puristumaan}} \leq F_{\text{kinmoisa.puristuma}} = 1$$

MIKÄLI EDELLÄKUVATTUJEN EHTOJEN TASOISTA MIKÄÄN EI TÄYTY KOKONAISUUDESSAAN, LUOKITELLAAN LIITOS RUUVIEN KESTÄVYYDEN NÄKÖKULMASTA JÄYKÄKSI. JÄYKÄN LIITOKSEN TULEE KESTÄÄ SE VOIMA, MIKÄ SYNTYY KANNAKELEVYN REUNAN MYÖTÄÄMISEN ALOITTAVAN VOIMAN JA LEIKKAUSVOIMAN RESULTANTISTA. ON HUOMIONARVOISTA, ETTEI PELKÄN LIITOKSEN JÄYKÄKSI MÄÄRITTELY PULTTIEN KANNALTA MÄÄRITTELE RAKENNEMALLIN TAI SUUREMMAN KOKONAISUUDEN KANNALTA LIITOKSEN JÄYKKYYTTÄ. MITOITETTAVAA LIITOSTA YMPÄRÖIVIEN RAKENTEIDEN JÄYKKYYS KOKONAISUUTENA, SEKÄ VAAKASIIRTYMÄT ERÄINÄ MAINITTAVINA SEIKKOINA MÄÄRITTELEVÄT LIITOKSEN RAKENNEKOKONAISUUDEN KANNALTA.



LIITOS = "NIVELELLINEN"

PULTTIIN VAIKUTTAVAT VOIMAT

LIITOKSEN LEIKKAUSKESTÄVYYDEN_KA = 20.0%

 $V_{\text{Ed.korvake}} = 170\text{ kN}$

LIITOKSEN REUNAPURISTUSKESTÄVYYDEN_KA = 23.0%

 $F_{\text{vaakakomp}} = 0\text{ kN}$

LIITOKSEN PALAMURTUMISKESTÄVYYDEN_KA = 3.0%

LIITOKSEN TOIMIVUUS_SITKEÄSTI = "LIITOS ON SITKEÄ! REUNAPURISTUSKESTÄVYYS < LEIKKAUSKESTÄVYYS!"

 $F_{v.Rd} = 217\text{ kN}$ $V_{\text{mitoitava}} = 43\text{ kN}$ $F_{b.Rd} = 184\text{ kN}$ $V_{\text{eff.Rd}} = 1320\text{ kN}$