



Sami Jokitalo

Teräksisen HI-palkin laskentapohja

Teräksisen HI-palkin laskentapohja

Sami Jokitalo
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Rakennesuunnittelu

Tekijä: Sami Jokitalo
Opinnäytetyön nimi: Teräksisen HI-palkin laskentapohja
Työn ohjaaja: Kai Kuula
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2012
Sivumäärä: 58

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Mathcad-laskentapohja yksiaukkoi-
selle teräksiselle harjapalkille. Laskentapohja mitoittaa palkin poikkileikkausluo-
kassa 4. Laskentapohja laskee SFS-EN 1990 ja Suomen kansallisen liitteen
mukaiset kuormitusyhdistelyt ja mitoittaa palkin SFS-EN 1993-1-1 ja SFS-EN
1993-1-5 mukaan. Tilaajalle eli Pöyry Finland Oy:lle tuli tarve laskentapohjan
tekemiseen Eurokoodien tullessa viralliseksi suunnitteluohjeiksi ja näin ei voitai-
si käyttää enää vanhoja laskentapohjia. Lisäksi mitoitusohjelmat eivät huomioi
poikkileikkausluokassa 4 olevaa tehollista pinta-alaa ja harjapalkin käsin laske-
minen on erittäin työlästä.

Lopputuloksena saatiin laskentapohja, jolla voidaan tarkistaa palkille tulevien
rasitusten suhteet kestävyyskäsitteisiin. Laskentapohjasta tuli pitkä, koska kaikki las-
kelmat ja pohjan tekemät rajaukset haluttiin näkyviin, jotta voitaisiin paremmin
seurata laskelmia ja arvioida laskentapohjan toimintaa. Laskentapohja laskee
palkin taivutuskestävyyden, leikkauskestävyyden, pistekuormakestäväyyden,
yhteisvaikutukset ja poikittaiset jäykisteet.

Laskentapohjalla voidaan laskea mitoittavat rasitukset ja mitoittavat kestävyys-
käsitteet, mikä tekee siitä monipuolisen. Laskentapohjaa voitaisiin laajentaa tulevai-
suudessa vastaamaan useampia kuormitustilanteita. Lisäksi sitä voitaisiin laa-
jentaa laskemaan uumassa olevat aukot ja palkin hitsit, mikäli laskentapohja
saadaan toimimaan jouhevasti. Laskentapohjaa olisi helppo kehittää eteenpäin,
koska kaikki kaavat ovat näkyvillä ja lähteet merkittyinä.

Asiasanat: Teräspalkki, Harjapalkki, Laskentapohja, Mathcad-laskentapohja

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author: Sami Jokitalo

Title of thesis: Calculation Template of Steel Ridge Beam

Supervisor: Kai Kuula

Term and year when the thesis was submitted: spring 2012

Pages: 58

The aim of this study was to make a Mathcad program which calculates single-span steel ridge beam. The program calculates the beam in class 4 cross sections. The program calculates loading cases according to standard SFS-EN 1990 and Finnish national annex. Thereafter, the beam is designed according to standard SFS-EN 1993-1-1 and SFS-EN 1993-1-5. The work was commissioned by Pöyry Finland Ltd. The Mathcad program is needed because Eurocodes became official design standards and the old design standards are no longer accurate. Therefore, the old calculating programs are not useful anymore. In addition, other design programs are not taking into account a cross section of class 4 in the effective cross-section area and calculating the ridge beam by hand is very laborious.

As a result of this graduate study, a calculation program which can check the beam strains and their proportion of capacities was achieved. The calculation program became long, because all the calculations and the limitations wanted to be seen, in order to better monitor and evaluate the calculations. The calculation program designs resistance for bending, shear, lateral buckling, single load, combined effects and vertical stiffener plates.

The program calculates the design loads and rated capacity which makes it versatile. The calculation program could be expanded in the future to calculate several load situations. Further, it could be developed to calculate the gaps in the web and welds of the beam, in case the program turns out to work smoothly. The program would be easy to develop further, because all of the formulas are displayed and all the sources are marked.

Keywords: Steel beam, Ridge beam, Calculation template, Calculation template of Mathcad

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
MERKKIEN SELITYKSET	7
1 JOHDANTO	11
2 HI-PALKIN MITOITUS	13
2.1 Hitsattu profiili	13
2.1.1 Normaalijännitysten aiheuttama lommahdus	14
2.1.2 Tehollinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4	14
2.1.3 Uuman lommahtamisesta johtuva laipan nurjahdus	17
2.2 Kiepahdus	18
2.3 Leikkauslommahdus	23
2.4 Pistekuormakestävyys	27
2.5 Yhteisvaikutukset	30
2.5.1 Taivutus ja leikkaus	30
2.5.2 Taivutusmomentti ja pistekuorma	32
2.6 Jäykisteet	32
2.6.1 Päätyjäykisteet	32
2.6.2 Poikittaiset välijäykisteet	33
2.6.3 Jäykisteiden kestävyys	34
2.7 Taipuma	36
3 LASKENTAPOHJA	38
3.1 Laskentapohjan toimintaperiaate	38
3.2 Laskentapohjan rajaukset	40
3.3 Laskentapohjan toteutus	41
3.3.1 Mitoitustarkastelut	41
3.3.2 Rakennemalli ja kuormitusyhdistelyt	42
3.3.3 Taivutusmitoitus	44
3.3.4 Kiepahdus	47
3.3.5 Leikkauslommahdus	47

3.3.6 Yhteisvaikutukset	49
3.3.7 Pistekuormakestävyys	51
3.3.8 Jäykisteet	51
3.3.9 Taipuma	52
3.3.10 Laskentapohjalle syötettävät lähtöarvot	53
4 POHDINTA	56
LÄHTEET	58

MERKKIEN SELITYKSET

A_f	laippojen pinta-ala (mm^2)
A_{fc}	puristetun laipan tehollinen pinta-ala (mm^2)
$A_{f,\text{eff}}$	laippojen tehollinen pinta-ala (mm^2)
A_{st}	yhden kaksipuoleisen jäykisteen poikkipinta-ala, jolloin pinta-alaan lasketaan mukaan uuman molemmilla puolilla oleva osuus sekä jäykisteiden väliin jäävä uuman levyosa, jonka leveys on t_s (mm^2)
A_w	uuman pinta-ala (mm^2)
C_1, C_2, C_3	vakiota, jotka riippuvat kuormituksista
E	kimmomoduuli (N/mm^2)
G	liukumoduuli (N/mm^2)
$G_{k,j}$	pysyvän kuorman j ominaisarvo
I_{fc}	puristetun laipan tehollinen neliömomentti heikomman pääjäyhyys-akselin suhteen
I_{ft}	vedetyn laipan tehollinen neliömomentti heikomman pääjäyhyys-akselin suhteen (mm^4)
I_{eff}	tehollinen neliömomentti (mm^4)
I_p	pelkän jäykisteen polaarinen neliömomentti levyyn kiinnitetyn reunan suhteen (mm^4)
I_t	vääntöneliömomentti (N/mm^4)
I_w	käyristymisjäyhyys (mm^6)
I_z	neliömomentti heikomman akselin suhteen (mm^4)
$I_{z,1}$	ylälaipan neliömomentti poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen (mm^4)
$I_{z,2}$	alalaipan neliömomentti poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen (mm^4)
L_c	kiepahdustukien väli (mm)

L_e	on taivutusmomentin nollakohtien väli (mm)
L_{eff}	tehollinen pituus poikittaisten kuormien suhteen kestävyyslaskelmia varten
$M_{b,Rd}$	kiepahduskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)
$M_{c,Rd}$	taivutuskestävyys (Nmm)
M_{cr}	kimmoteorian mukainen kiepahdusmomentti (Nmm)
M_{Ed}	taivutusmomentin mitoitusarvo (Nmm)
$M_{f,Rd}$	poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon (Nmm)
$M_{pl,Rd}$	koko poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys (Nmm)
$N_{st.c,Rd}$	jäykisteen poikkileikkauksen kestävyys (N)
$N_{st.ten}$	profiilin uuman leikkausvoimasta muodostuva vetokenttäteorian mukaisen kalvojäännityksen pystykomponentti (N)
M_x	palkilla oleva taivutusmomentti kohdassa x (Nmm)
$Q_{k,1}$	määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{k,i}$	muun samanaikaisen muuttuvan kuorman i ominaisarvo
$V_{bf,Rd}$	laippojen osuus leikkauslommahduskestävyydestä (N)
$V_{bw,Rd}$	uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä (N)
V_{Ed}	leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa (N)
$V_{pl,Rd}$	plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys (N)
$W_{eff,min}$	taivutusvastus poikkileikkausluokassa 4 (mm ³)
$W_{pl,y}$	plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (mm) poikittaisjäykisteiden välinen etäisyys (mm)
b_f	laipan leveys (mm)
b_i	tarkasteltavan levyosa leveys (mm)

b_0	on yhdeltä reunalta tuetun laipan leveys tai puolet kahdelta reunalta tuetun laipan leveydestä (mm)
\bar{b}	tarkoituksen mukainen leveys
c	pistekuorman etäisyys palkin tukemattomasta päädystä (mm)
e	jäykisteiden keskilinjojen välinen etäisyys (mm)
e_c	suurin reunaetäisyys (mm)
f_y	teräksen myötölujuus (N/mm ²)
f_{yf}	puristetun laipan nimellinen myötölujuus (N/mm ²)
f_{yw}	uuman nimellinen möytölujuus (N/mm ²)
h	palkin korkeus (mm)
h_f	laippojen painopisteiden välinen etäisyys (mm)
h_w	uuman korkeus (mm)
h_1	ylälaipan keskilinjan ja painopisteen välinen etäisyys (mm)
h_2	alalaipan keskilinjan ja painopisteen välinen etäisyys (mm)
k_ω, k_z	teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä
k_σ	jännityssuhdetta ψ ja reunaehtoja vastaava lommahduskerroin
k_τ	leikkauslommahduskerroin
l_y	kyseeseen tulevan jäykän tukipinnan pituuteen s_s liittyvä tehollinen kuormituspituus (mm) (kuva 6)
r	tarkasteltavan kohdan ja palkin keskikohdan välinen etäisyys (mm)
t	levyn paksuus (mm)
t_f	laipan paksuus (mm)
t_w	uuman paksuus (mm)
t_i	tarkasteltavan levyosan paksuus (mm)
y''_n	tarkasteltavan palkin osapätkän suhteellinen momentti

z_a	etäisyys painopisteestä kuorman vaikutuskohtaan poikkileikkauksen korkeussuunnassa, $z_a > 0$ painopisteen yläpuolella, $z_a < 0$ painopisteen alapuolella
z_s	vääntökeskiön etäisyys painopisteestä (mm) (kaksoissymmetrinen poikkileikkaus $z_s = 0\text{mm}$)
α_{LT}	sovellettavan kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä
χ_F	paikallisen lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä
χ_{LT}	kiepahduskestävyyden pienennystekijä
χ_w	uuman osuuden pienennystekijä
ϕ_{LT}	kiepahduskestävyyden pienennystekijän χ_{LT} määrittämiseen tarvittava muuttuja
$\gamma_{G,j}$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
γ_{M1}	osavarmuusluku
η	muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä
$\bar{\lambda}_{LT}$	sauvan muunnettu hoikkuus
$\bar{\lambda}_p$	muunnettu hoikkuus
ξ	epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin
$\sigma_{\text{com.Ed.ser}}$	tarkasteltavan taso-osan suurin puristusjännitys laskettuna tehollisen poikkileikkauksen perusteella käyttörajatilan kuormilla, kun kaikki samanaikaisesti vaikuttavat kuormat otetaan huomioon (N/mm^2)
ψ	jännityssuhde
$\psi_{Q,i}$	muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

1 JOHDANTO

Uusien suunnitteluohjeiden eli Eurokoodien tulo on tuonut paljon muutoksia rakenteiden suunnitteluun. Tästä johtuen vanhoihin suunnitteluohjeisiin perustuvat laskenta ja ohjeet ovat vanhentumassa. Eurokoodien myötä sekä rasituksien että kestävyyksien laskenta on muuttunut.

Uumaltaan hoikkia ja poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvia palkkeja kutsutaan yleensä ohutuumpalkeiksi. Ohutuumaisen harjapalkin laskeminen käsin on erittäin työlästä. Poikkileikkaukseltaan muuttuva palkki vaatii paljon erilaisia laskelmia ja myös Eurokoodit tuovat lisää monimutkaisuutta laskentaan. Toisaalta ohutuumaista harjapalkkia ei pysty mitoittamaan laskentaohjelmilla, koska ne eivät huomioi poikkileikkausluokassa 4 olevaa I-profiilin tehollista pinta-alaa. Lisäksi on mielekkäämpää tehdä laskentapohja Mathcadilla kuin Exelillä, koska Mathcadissa laskentakaavat näkyvät jatkuvasti ja tällöin voidaan seurata laskentaa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä Mathcad-laskentapohja, jossa tehdään SFS-EN 1990 ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset kuormitusyhdistelyt murtorajatilassa ja käyttörajatilassa ja mitoitetaan teräksinen yksiaukkoinen nivelellisesti tuettu harjapalkki Eurokoodien ohjeiden mukaan. Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan ohutuumaista harjapalkkia, jossa uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 4. Tavoitteena on saada laskentapohja, jolla suunnittelijat kykenevät mitoittamaan harjapalkin vain syöttämällä määrättyjä arvoja laskentapohjaan. Aluksi täytyy syöttää kuormat ja niiden sijainnit ja sen jälkeen laskentapohja laskee kuormitusyhdistelyt murtorajatilassa ja käyttörajatilassa. Tämän jälkeen käyttäjä päättää itse, millä kuormitusyhdistelyllä palkki mitoitetaan. Laskentapohjaan tulee syöttää myös palkin mitat ja muutamia muita laskentaan liittyviä arvoja. Sitten laskentapohja laskee kestävyudet ja, mikäli jokin kestävyys ei riitä, laskentapohja ilmoittaa siitä.

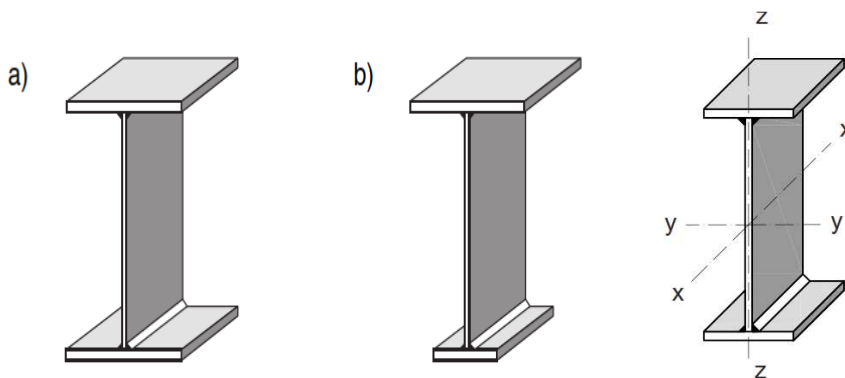
Kuormituksina laskentapohjalle voidaan antaa omapaino, lumi, tuuli sekä kaksi pysyvää pistekuormaa. Vaakakuormia ei huomioida. Laskentapohja ei mitoita palkin pituussuuntaisia jäykisteitä, uumassa olevia reikiä eikä hitsejä. Taipuma

lasketaan ainoastaan palkin keskelle käyttäen yhtä jatkuvaa kuormitusta. Laskettu taipuman arvo on siis vain arvio todellisesta taipumasta. Laskentapohjalla voidaan tarkistaa taivutuskestävyys, leikkauskestävyys, pistekuormakestävyys, taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus, pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus, taipuma palkin keskelle ja jäykisteiden kestävyys.

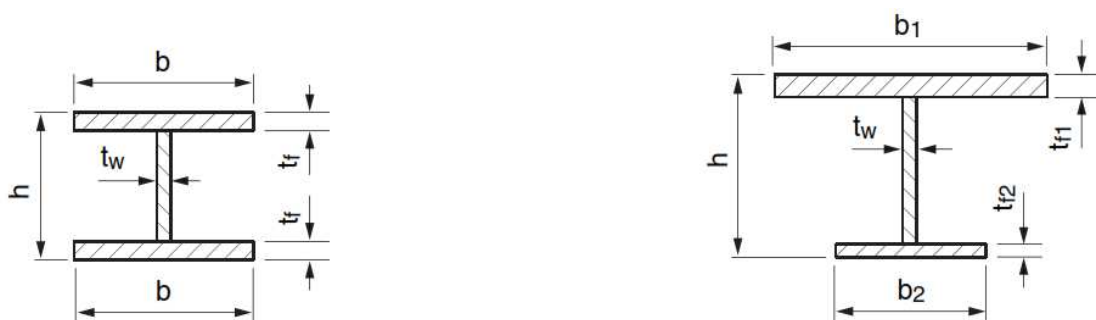
2 HI-PALKIN MITOITUS

2.1 Hitsattu profiili

Talonrakentamisessa sekä teollisuusrakentamisessa yleisin profiilimuoto on I-profiili (kuva 1 a). Epäsymmetristä I-profiilia (kuva 1 b) käytetään erityisesti nosturiratapalkeissa. Jos hitsatun palkin korkeutta ei ole rajoitettu, I-palkista voidaan tehdä ohuuumapalkki. Ohuuumapalkki on korkea ohuuumainen palkki, jota käytetään yleensä kattokannattajana. Kuvassa 1 on myös havainnollistettu sauvan akselisto. Kun ohuuumapalkkia käytetään kattopalkkina, siitä voidaan tehdä harjapalkki, jotta katolle saadaan kaltevuutta ja palkin taivutuskestävyys paranee palkin keskellä. Kuvassa 2 esitetään hitsatuille I-profiileille suositeltavat merkinnät. (1, s. 11, 77.)



KUVA 1. Hitsattujen profiilien poikkileikkauksia ja sauvan akselisto (1, s. 11, 77)



KUVA 2. Profiilien merkinnät (1, s. 12)

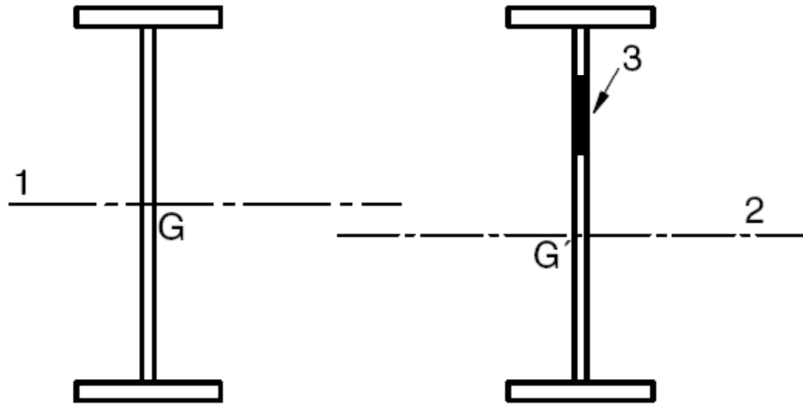
2.1.1 Normaalijännitysten aiheuttama lommahdus

Normaalijännityksiin perustuvia tehollisen korkeuden, leikkauslommahduskestävyyttä kuvaavia ja poikittaisista kuormista aiheutuvaa lommahdusta kuvaavia malleja sekä näiden yhteisvaikutusmalleja voidaan käyttää murtorajatilassa va-kiopoikkileikkauksisille sauvoille, kun seuraavat ehdot ovat voimassa:

- Levykentät ovat suorakaiteenmuotoisia ja laipat ovat samansuuntaisia, mutta tätä sääntöä voidaan käyttää myös ei-suorakaiteenmuotoiselle levykentälle, jonka kaltevuus α on enintään 10 astetta.
- Jäykistämättömän avoimen reijän tai pienen aukon halkaisija on enintään $0,05b$, missä b on levyn leveys.
- Kuormitus on levyn tason suuntainen.
- Puristettu laippa ei lommahda uuman suunnassa.
- Jäykisteet ovat pituus- tai poikittaissuuntaisia. (2, s. 7 - 8.)

2.1.2 Tehollinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4

Poikkileikkausluokassa 4 kuuluvassa poikkileikkauksessa tapahtuu paikallinen lommahdus ennen kuin poikkileikkauksen suurin puristusjännitys jossakin tasoosassa on saavuttanut myötölujuuden. Tästä syystä vain osa poikkileikkauksesta on tehollista. Poikkileikkauksen kestävyudet lasketaan tällöin vain tehollisten pinta-alojen perusteella. Tehollinen poikkileikkaus on erilainen taivutuksessa kuin puristuksessa. Tehollista poikkileikkausta on havainnollistettu taivutusmomentille kuvassa 3. (2, s. 14.)

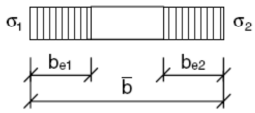
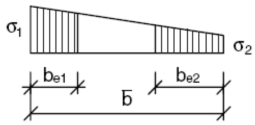
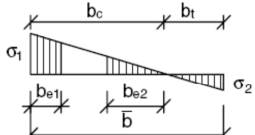


- G* bruttopoikkileikkauksen painopiste
G' tehollisen poikkileikkauksen painopiste
1 bruttopoikkileikkauksen neutraaliakseli
2 tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli
3 tehoton alue

KUVA 3. Poikkileikkausluokka 4 taivutusmomentin laskennassa käytettävä tehollinen poikkileikkaus (1, s.15)

Tehollinen poikkileikkaus voidaan määrittää samanaikaisesti vaikuttavista taivutusmomentista ja normaalivoimasta. On kuitenkin huomioitava palkin painopisteen G siirtyminen. Tehollinen pinta-ala A_{eff} lasketaan vähentämällä bruttopoikkileikkauksesta tehoton alue. Laipan jännitykset lasketaan laipan keskilinjalla käyttäen kimmoteorian mukaista taivutusvastusta. Menetelmä on iteratiivinen, koska jännityssuhde muuttuu palkin painopisteen muuttuessa. Poikkileikkausluokassa 4 tasomaisten puristettujen osien teholliset leveydet määritetään kahdelta reunalta tuetuille osille käyttäen taulukkoa 2. (1, s. 87; 2, s. 14.)

TAULUKKO 2. Kahdelta reunalta tuetut taso-osat (2, s.18)

Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)				Tehollinen ^p leveys b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi \leq 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Lommahduskerroin k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Taulukossa 2 esitettyjen tehollisten leveyksien laskentaan tarvittava lommahduksen huomioonottava pienennystekijä ρ lasketaan kahdelta reunalta tuetuille tasoille kaavasta 1. Pienennystekijä ρ laskennassa tarvittava muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_p$ lasketaan kaavasta 2. (2, s. 16.)

Pienennystekijä ρ lasketaan kaavalla 1 (2, s. 16).

$$\rho = 1,0 \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ missä } (3 + \psi) \geq 0 \quad \text{KAAVA 1}$$

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_p$ lasketaan kaavalla 2 (2, s. 16).

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{24,8 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad \text{KAAVA 2}$$

$\psi =$ jännityssuhde

$\bar{b} =$ tarkoituksen mukainen leveys seuraavasti

$$b_w = \text{uumat (mm)}$$

b = kahdelta reunalta tuetun laipan taso-osat (mm)

k_σ = jännityssuhdetta ψ ja reunaehtoja vastaava lommahduskerroin

t = levyn paksuus (mm)

$$\varepsilon = \frac{235}{f_y \left[\frac{N}{mm^2} \right]}$$

Käyttörajatilassa tarvittavan neliömomentin laskemiseksi määritetään tehollinen poikkileikkaus edellä mainitusti, mutta käytetään muunnettuna hoikkuutena arvoa $\bar{\lambda}_{p.ser}$, joka lasketaan kaavasta 3 (1, s. 92.)

$$\bar{\lambda}_{p.ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed.ser}}{f_y}} \quad \text{KAAVA 3}$$

$\bar{\lambda}_p$ = muunnettu hoikkuus (kaava 12)

$\sigma_{com.Ed.ser}$ = tarkasteltavan taso-osan suurin puristusjännitys laskettuna tehollisen poikkileikkauksen perusteella käyttörajatilan kuormilla, kun kaikki samanlaisesti vaikuttavat kuormat otetaan huomioon (N/mm²)

2.1.3 Uuman lommahtamisesta johtuva laipan nurjahdus

Jos profiilin uuma ei ole riittävän vahva, puristettu laippa voi nurjahtaa uuman tasossa. Tämä johtuu siitä, että hoikka uuma ei pysty tukemaan laippoja tarpeeksi. Erityisesti ohutuumpalkin mitoituksessa ilmiöön on syytä kiinnittää huomiota. Nurjahtamisen estämiseksi kaavan 4 mukainen ehto on toteuduttava. (1, s. 128.)

Uuman lommahtamisesta johtuva laipan nurjahdus tarkistetaan kaavasta 4 (2, s. 32).

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad \text{KAAVA 4}$$

A_w = uuman pinta-ala (mm²)

A_{fc} = puristetun laipan tehollinen pinta-ala (mm²)

h_w = uuman korkeus (mm)

t_w = uuman paksuus (mm)

$k = 0,3$ poikkieleikkausluokan 1 laipoille,

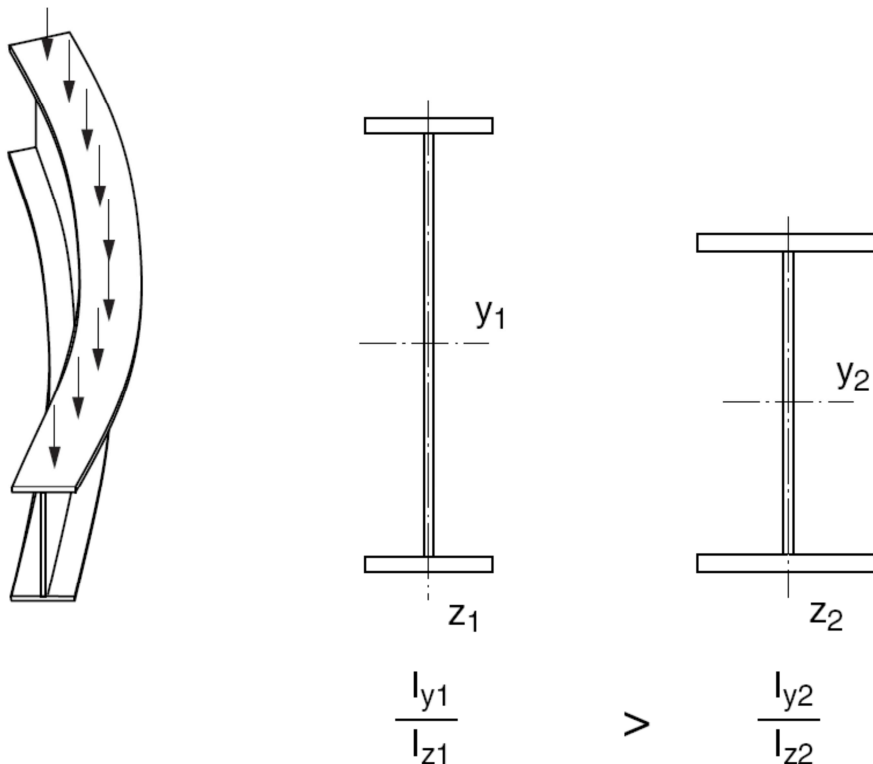
$k = 0,4$ poikkieleikkausluokan 2 laipalle,

$k = 0,55$ poikkileikkausluokkien 3 ja 4 laipoille

f_{yf} = puristetun laipan nimellinen myötölujuus (N/mm^2)

2.2 Kiepahdus

Kun taivutetaan sauvaa vahvemman akselin suhteen puristettu laippa saattaa menettää stabiiliutensa nurjahtamalla sivusuuntaan, jolloin sauvaa samalla kiertyy pituusakselinsa ympäri. Tätä ilmiötä kutsutaan kiepahdukseksi. Kuvassa 4 havainnollistetaan kiepahdusta. Sauvojen, joiden vääntöjäykkyys on pieni, ovat herkkiä kiepahdukselle. Näistä ovat esimerkkejä hoikat ja korkeat I-profiilit. Kiepahdukseen vaikuttavat sauvan pituus, kuormitus, profiilin poikkileikkausarvot, sauvan tuenta ja materiaaliominaisuudet. (1, s. 140.)



KUVA 4. Palkin kiepahdus ja poikkileikkauksen muodon vaikutus (1, s. 140)

Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{b,Rd}$ lasketaan vahvemman akselin suhteen taivutetulle sivusuunnassa tukemattomalle sauvalle kaavasta 5 (3, s. 65).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,min} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

KAAVA 5

$M_{b,Rd}$ = kiepahduskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)

χ_{LT} = kiepahduskestävyyden pienennystekijä

$W_{eff,min}$ = tehollinen taivutusvastus poikkileikkausluokassa 4 (mm³)

f_y = teräksen myötölujuus N/mm²)

γ_{M1} = osavarmuusluku

Taivutetun sauvan mitoitusehto kiepahdukselle tarkistetaan kaavalla 6 (3, s. 65).

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

KAAVA 6

M_{Ed} = taivutusmomentin mitoitusarvo (Nmm)

$M_{b,Rd}$ = kiepahduskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)

Pelkkä poikkileikkauksen kestävyys tarkistaminen riittää useissa tapauksissa, esimerkiksi kun puristettu laippa on tuettu sivusiirtymistä vastaan riittävän tiheästi tai poikkileikkauksella on luonnostaan korkea poikittainen jäykkyys (kaava 7). (2, s. 53; 4, s. 49).

Kiepahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos sauvan hoikkuus täyttää kaavan 7 ehdon (4, s. 49).

$$\lambda_{LT} \leq 0,2$$

KAAVA 7

λ_{LT} = muunnettu hoikkuus kiepahdusta tarkasteltaessa

Eurocoden osa SFS-EN 1993-1-1 antaa kaksi eri menetelmää kiepahduskestävyyden laskemiseksi. Tässä opinnäytetyössä käytetään niin sanottua yleistä tapaa, joka antaa enemmän varmallia puolella olevia tuloksia ja soveltuu uumaltaan tai laipoiltaan hoikille profiileille. Laskennassa käytetään Suomen kansallisen liitteen mukaisia määräyksiä kiepahduskäyrien ja kiepahduskäyriä vastaaville epätarkkuustekijöille, jotka ovat myös Eurocoden osan SFS-EN 1993-1-1 mukaisia suosituksia. (1, s. 141; 5, s. 4.)

Yleisessä menettelyssä kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan kaavoilla 8 ja 9. Laskennassa tarvitaan lisäksi kiepahduskäyrien epätarkkuuste-

kijä α_{LT} , joka määräytyy korkeuden ja leveyden suhteesta. Jos palkin korkeuden suhde leveyteen on pienempi kuin kaksi, kiepahduskäyräksi tulee c. Mikäli suhde on yli kaksi, kiepahduskäyräksi tulee d. Kiepahduskäyrien epätarkkuustekijälle α_{LT} tulee arvo 0,49, kun kiepahduskäyrä on c, ja α_{LT} on 0,76, kun kiepahduskäyrä on d. Kiepahduskestävyyden pienennystekijän laskemiseksi täytyy laskea lisäksi sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT}$ (kaava 11) ja ϕ_{LT} (kaava 10), joiden määrittämiseen tarvitaan kimmoteorian mukainen kiepahdusmomentti M_{cr} . (1, s. 142.)

Kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan kaavoilla 8 ja 9 (1, s. 142).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad \text{kun } \bar{\lambda}_{LT}^2 > 0,2 \quad \text{KAAVA 8}$$

$$\chi_{LT} = 1 \quad \text{kun } \bar{\lambda}_{LT}^2 \leq 0,2 \quad \text{KAAVA 9}$$

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

ϕ_{LT} = kiepahduskestävyyden pienennystekijän χ_{LT} määrittämiseen tarvittava muuttuja

ϕ_{LT} lasketaan kaavalla 10 (1, s. 142).

$$\phi_{LT} = 0,5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2)) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \quad \text{KAAVA 10}$$

Sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT}$ lasketaan kaavasta 11 (1, s. 142).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{\text{eff,min}} f_y}{M_{cr}}} \quad \text{KAAVA 11}$$

$W_{\text{eff,min}}$ = poikkileikkauksen mukainen taivutusvastus (mm^3)

M_{cr} = kimmoteorian mukainen kiepahdusmomentti (Nmm)

Kimmoteorian mukainen kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan heikomman pääjäyhyysakselin suhteen symmetrisille profiileille kaavalla 12. Tällöin sauvaan ei saa kohdistua primäärisiä tai sekundäärisiä vääntömomenteja. On huomattava, että poikkileikkauksen ominaisuudet määritetään bruttopoikkileikkauksen mukaan. (1, s. 143.)

Kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan kaavasta 12 (4, Liite L3.6 (korjattu 16.02.2011)).

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(L_c)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 * \frac{I_w}{I_z} + \frac{(L_c)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right] \quad \text{KAAVA 12}$$

Kaksoissymmetrisillä poikkileikkauksilla kaava lyhenee ja M_{cr} lasketaan kaavasta 13 (2, Liite L3.6 (korjattu 16.02.2011)).

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(L_c)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 * \frac{I_w}{I_z} + \frac{(L_c)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right] \quad \text{KAAVA 13}$$

C_1, C_2, C_3 = vakiota, jotka riippuvat kuormituksista

I_z = neliömomentti heikomman akselin suhteen (mm^4)

I_w = käyristymisjäyhyys (mm^6)

E = kimmomoduli (N/mm^2)

G = liukumoduuli (N/mm^2)

L_c = kiepahdustukien väli tai jos palkki on tuettu vain päistään, $k_z L_c = L_c$ (mm)

k_w, k_z = teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä (liite 4)

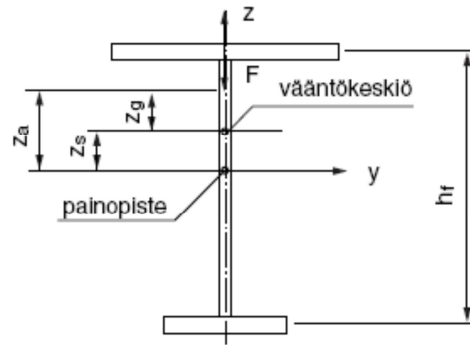
I_t = vääntöneliömomentti (N/mm^4)

$z_g = z_a - z_s$ (mm)

z_a = etäisyys painopisteestä kuorman vaikutuskohtaan poikkileikkauksen korkeussuunnassa, $z_a > 0$ painopisteen yläpuolella, $z_a < 0$ painopisteen alapuolella

z_s = vääntökeskiön etäisyys painopisteestä (mm) (kaksoissymmetrinen poikkileikkaus $z_s = 0 \text{ mm}$)

Mikäli palkki on vain heikomman akselin suhteen symmetrinen, täytyy kiepahdusmomentin laskennassa ottaa huomioon vääntökeskiön siirtyminen. Kuvassa 5 on esitetty merkinnät profiilille, jolla on erikokoiset laipat. (1, s. 143.)



KUVA 5. Heikomman akselin suhteen symmetrisen profiilin merkinnät (1, s.143)

Vääntökeskiön etäisyys painopisteestä lasketaan kaavalla 14, kun ylälaippa ja alalaippa ovat erikokoisia (6, s. 7).

$$z_s = \frac{h_1 I_{z,1} - h_2 I_{z,2}}{I_{z,1} + I_{z,2}} \quad \text{KAAVA 14}$$

h_1 = ylälaipan keskilinjan ja painopisteen välinen etäisyys (mm)

$I_{z,1}$ = ylälaipan neliömomentti poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen (mm^4)

h_2 = alalaipan keskilinjan ja painopisteen välinen etäisyys (mm)

$I_{z,2}$ = alalaipan neliömomentti poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen (mm^4)

Käyritysmisjäyhyys kaksoissymmetrisille profiileille lasketaan kaavasta 15 (1, s. 144).

$$I_\omega = 0,25 h_f^2 I_z \quad \text{KAAVA 15}$$

h_f = Laippojen painopisteiden välinen etäisyys (mm)

Heikomman akselin suhteen symmetriselle poikkileikkaukselle z_j voidaan laskea likimääräisesti kaavalla 16 ja z_j laskennassa tarvittava aputermi β_f kaavalla 17 (1, s. 144).

$$z_j = 1 * (2\beta_f - 1) \frac{\beta_f}{2}, \text{ kun } \beta_f \leq 0,5$$

$$z_j = 0,8 * (2\beta_f - 1) \frac{\beta_f}{2}, \text{ kun } \beta_f > 0,5$$

KAAVA 16

$$\beta_f = \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}} \quad \text{KAAVA 17}$$

I_{fc} = puristetun laipan tehollinen neliömomentti heikomman pääjäyhyysakselin suhteen (mm^4)

I_{ft} = vedetyn laipan tehollinen neliömomentti heikomman pääjäyhyysakselin suhteen (mm^4)

käyritysmisjäyhyys I_ω heikomman akselin suhteen symmetriselle poikkileikkaukselle lasketaan kaavalla 18 (1, s. 144).

$$I_\omega = \beta_f(1 - \beta_f) * I_z h_f \quad \text{KAAVA 18}$$

Vääntöneliömomentti saadaan I-poikkileikkaukselle kaavalla 19 (1, s. 144).

$$I_t = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 b_i t_i^3 \quad \text{KAAVA 19}$$

b_i = tarkasteltavan levyosa leveys (mm)

t_i = tarkasteltavan levyosan paksuus (mm)

2.3 Leikkauslommahdus

Kun profiilin uuma on tarpeeksi hoikka, se voi lommahtaa leikkausvoiman vaikutuksesta ennen kuin plastinen leikkauskestävyys saavutetaan. Leikkauslommahduksen tarkistus tulee yleensä kysymykseen ohutuumapalkkia mitoitettaessa. Leikkauslommahduskestävyyden määrittämiseksi voidaan käyttää EN 1993-1-5 kohdan mukaisia kaavoja ja sääntöjä, mikäli luvun 2.1.1 (s. 14) mukaiset ehdot ovat voimassa. Leikkauslommahduskestävyyden huomioiminen tarkistetaan kaavoilla 20 ja 21. Jos kaavojen 20 ja 21 mukaiset ehdot toteutuvat, profiili on varustettava myös poikittaisjäykisteillä tukien kohdalla. (1, s. 154; 2, s.23.)

Leikkauslommahdus pitää tarkastaa jäykistämättömille uumille, jos kaavan 20 mukainen ehto toteutuu (2, s. 23).

$$\frac{h_w}{t} > \frac{72\varepsilon}{\eta} \quad \text{jäykistämättömälle uumalle} \quad \text{KAAVA 20}$$

Leikkauslommahdus pitää tarkastaa jäykistetyille uumille, jos kaavan 21 mukainen ehto toteutuu (2, s. 23).

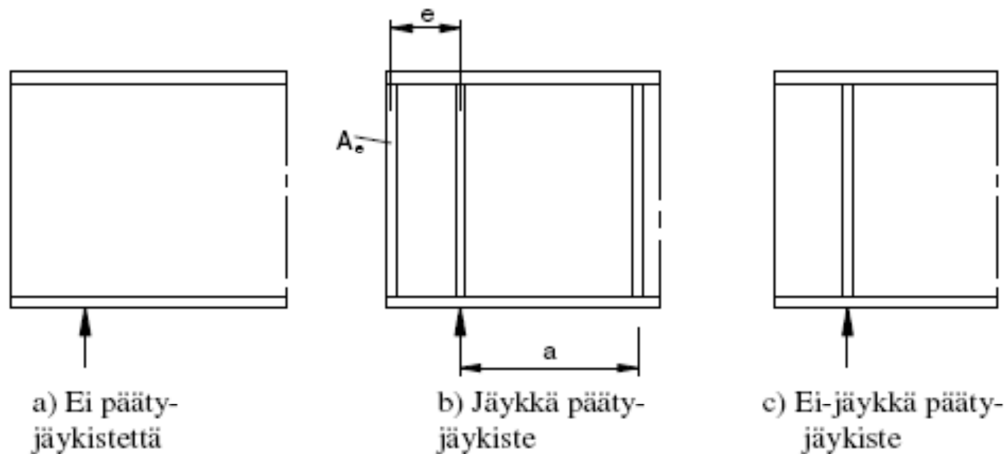
$$\frac{h_w}{t} > \frac{31\varepsilon}{\eta} \sqrt{k_\tau} \text{ poikittaisjäykisteillä jäkistetylle uumalle}$$

KAAVA 21

η = muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä

k_τ = leikkauslommahduskerroin

Leikkauslommahduskestävyyttä voidaan parantaa uuman poikittaisjäykisteillä. Poikittaisjäykisteet toimivat vertikaalisauvoina uuman toimiessa vetokenttäteorian mukaan. Jäykkä päätyjäykiste ottaa vastaan vetokentästä tulevat vaakavoimat. Poikittaisjäykisteet vahvistavat uumaa pistekuorman ja tuen kohdalla. Poikittaisjäykisteiden käyttö on ensisijainen uuman jäykistämistapa. Kuvassa 6 on esitetty palkin pään jäykistämistä pystyjäykistein. (1, s. 154; 2, s.24.)



KUVA 6. Päätyjäykisteet (2, s. 24)

Sekä laipat että uuma vaikuttavat leikkauslommahduskestävyyden $V_{b,Rd}$ suuruuteen (kaava 23). Myös tuella olevat päätyjäykisteet vaikuttavat leikkauskestävyyteen. Vetokentän voima täytyy ankkuroida toisessa kentän päässä ylälaippaan tai päättyyn, joka voi olla jäykkä tai ei-jäykkä, ja toisessa päässä alalaippaan. Leikkauslommahduskestävyyden mitoitus ehdossa mitoittavaa leikkausvoimaa verrataan uuman ja laipan yhteenlaskettuun leikkauskestävyyteen (kaava 22). (1, s. 156.)

Leikkauslommahduskestävyyden mitoitus ehto tarkastetaan kaavasta 22 (1, s. 156).

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$

KAAVA 22

$V_{b,Rd}$ = leikkauslommahdukestävyys (N)

Jäykistämättömien ja jäykistettyjen uumien leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta 22 (2, s. 23).

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

KAAVA 23

$V_{bw,Rd}$ = uuman osuus leikkauslommahdukestävyydestä (N)

$V_{bf,Rd}$ = laippojen osuus leikkauslommahdukestävyydestä (N)

jossa

Uuman osuus $V_{bw,Rd}$ lasketaan kaavasta 24 (2, s. 23).

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

KAAVA 24

χ_w = uuman osuuden pienennystekijä

Uuman osuuden pienennystekijä χ_w määritetään taulukosta 3 uumille, joissa on pystyjäykisteet vain tuilla, ja uumille, joissa on joko poikittaiset välijäykisteet tai pitkittäiset jäykisteet tai molemmat. Taulukko 3 perustuu luokitteluun ”jäykkä päätyjäykiste” ja ”ei-jäykkä päätyjäykiste”. Mikäli ei käytetä päätytukea lainkaan, pääty tarkastellaan erikseen pistekuormakestävyyden mukaan. (2, s. 24 ja 28.)

TAULUKKO 3. Pienennystekijä χ_w (2, s. 24)

	Jäykkä päätyjäykiste	Ei-jäykkä päätyjäykiste
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

Taulukossa 3 mainittu muunnettu hoikkuus lasketaan kaavalla 25 (2, s. 24 - 25).

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \epsilon t_w} \quad (\text{vain poikittaisjäykisteet tuella})$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \quad (\text{tukijäkisteiden lisäksi poikittaisjäykisteet}) \quad \text{KAAVA 25}$$

k_τ = uumakentän leikkauslommahduskertoimien pienin arvo

Kaavat leikkauslommahduskertoimille k_τ (kaava 26) soveltuvat ainoastaan sellaisille levykentille, joiden jäykistämiseen käytetyt poikittaisjäykisteet ovat niin sanottuja jäykkiä poikittaisjäykisteitä. Jos käytetään ei-jäykkiä poikittaisjäykisteitä, leikkauslommahduskerroin voidaan määrittää varmalla puolella yksinkertaisten siten, että ei-jäykät poikittaisjäykisteet ajatellaan poistetuksi, ja k_τ määritetään näin muodostuneiden levykenttien perusteella. (1, s. 157.)

Levyille, joissa on jäykät poikittaisjäykisteet, k_τ lasketaan kaavasta 26 (1, s. 157).

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad \text{kun } a/h_w \geq 1$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad \text{kun } a/h_w \leq 1 \quad \text{KAAVA 26}$$

a = poikittaisjäykisteiden välinen etäisyys (mm)

Jos laippojen kestävyttä ei hyödynnetä täysin taivutuskestävyyttä laskettaessa ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), laippojen vaikutus otetaan huomioon leikkauskestävyyden laskennassa (kaava 27). (2, s. 27.)

Laippojen vaikutus leikkauslommahduskestävyyteen lasketaan kaavalla 27 (7, s. 27).

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad \text{KAAVA 27}$$

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right)$$

a = poikittaisjäykisteiden välinen etäisyys (mm)

b_f ja t_f = valitaan laipan mukaan, mikä antaa pienimmän aksiaalisen kestävyden (mm)

b_f = saa olla enintään $15 \varepsilon t_f$ (mm)

Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{f,Rd}$ lasketaan kaavasta 28, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon. (1, s. 160).

$$M_{f,Rd} = h_f A_{f,eff} * \frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}$$

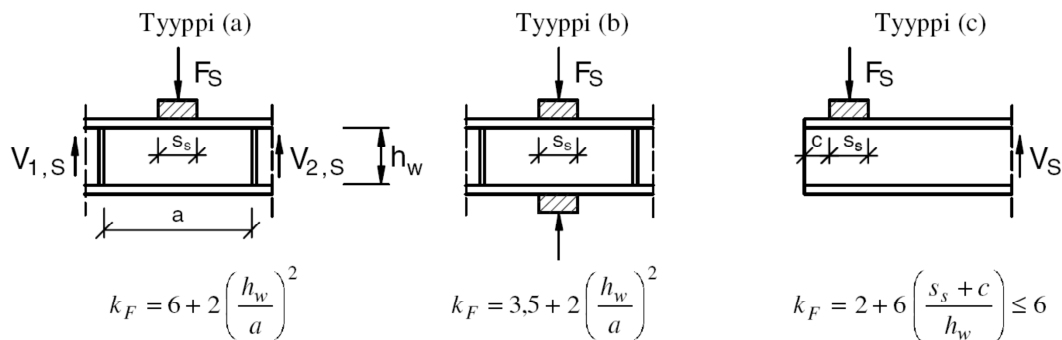
KAAVA 28

h_f = laippojen painopisteiden välinen etäisyys (mm)

$A_{f,eff}$ =laippojen tehollinen pinta-ala (mm²)

2.4 Pistekuormakestävyys

SFS-EN 1993-1-5 esitetyt säännöt valssattujen ja hitsattujen profiilien uumien kestävyydelle edellyttävät, että puristettu laippa on riittävästi tuettu sivusuunnassa. Huomattavaa on se, että pistekuormiin luetaan myös varsinaisten ulkoisten pistekuormien lisäksi myös palkin tukireaktiot. Lomahduskertoimet määrittyvät pistekuorman vaikutustapauksesta ja kuvassa 7 esitetään eri kuorman vaikutustapaukset. (1, s. 208; 2, s. 28.)



KUVA 7. Lomahduskertoimet eri kuormituksille (2, s. 28)

Kuvassa 6 olevat kuormatyytit a, b ja c voidaan määrittää seuraavasti:

- Kuorma vaikuttaa yhden laipan kautta ja siirtyy uuman leikkausvoimien välityksellä.

- b) Kuorma vaikuttaa yhden laipan kautta ja siirtyy uuman kautta suoraan toiselle laipalle.
- c) Kuorma vaikuttaa yhden laipan kautta jäykistämättömän savuan pään lähellä.

Jäykistämättömille ja jäykistetyille uumille kestävyuden mitoitusarvo pistekuormille paikallisen lommahduksen suhteen lasketaan kaavasta 29 (2, s. 28).

$$F_{Rd} = \frac{f_{yf} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \quad \text{KAAVA 29}$$

L_{eff} = tehollinen pituus poikittaisten kuormien suhteen kestävyyslaskelmia varten (mm) (kaava 30)

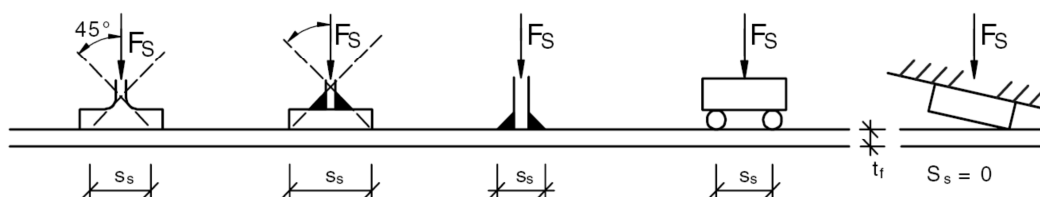
Tehollinen pituus L_{eff} lasketaan kaavalla 30 (2, s. 29).

$$L_{eff} = \chi_F * l_y \quad \text{KAAVA 30}$$

l_y = kyseeseen tulevan jäykän tukipinnan pituuteen s_s liittyvä tehollinen kuormituspituus (mm) (kuva 7)

χ_F = paikallisen lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä

Jäykän tukipinnan pituus s_s laipassa on se mitta, jonka matkalla kuorma jakaantuu tehollisesti. Se voidaan laskea olettamalla kuorman jakaantuvan kaltevuudessa 1:1. Kuitenkaan mitta s_s ei saa olla suurempi kuin h_w . Jos useita pisteittäisiä kuormia sijaitsee lähellä toisiaan, kestävyys tarkistetaan kullekin yksittäiselle kuormalle sekä kokonaiskuormalle. Jälkimmäisessä tapauksessa pituuden s_s arvoksi valitaan äärimmäisten pistekuormien keskiöiden välinen etäisyys. Jos kuormaa välittävä kantopinta muodostaa kulman laipan pinnan kanssa, pituuden s_s arvoksi valitaan nolla. Kuvassa 8 on esitetty tukipintojen pituuksia erilaisissa tapauksissa. (2, s. 29.)



KUVA 8. Jäykän tukipinnan pituus (2, s. 29)

Kestävyysliittymä tehollisen pituuden pienennystekijän χ_F (kaava 31) laskentaan joudutaan iteroimaan. Tehollisen kuormituspituuden l_y lasketaan kahden dimensiottoman apusuuren avulla, joista toinen m_2 määräytyy $\bar{\lambda}_F$:n arvosta (kaava 32). (1, s. 212; 2, s. 30.)

Tehollisen pituuden pienennystekijä χ_F lasketaan kaavoilla 31, 32 ja 33 (3, s. 30).

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad \text{KAAVA 31}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yf}}{F_{cr}}} \quad \text{KAAVA 32}$$

$$F_{cr} = 0,9 * k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad \text{KAAVA 33}$$

$k_F =$ (kuva 8)

Tehollinen kuormituspituus l_y (kaava 34) lasketaan apusuureiden m_1 ja m_2 avulla (kaavat 35 ja 36). Laskennassa joudutaan laskemaan useita eri arvoja ja laskentaan vaikuttavat lisäksi kuormatyyppi, joita ovat a, b ja c. Kuormatapauksissa a ja b tehollinen kuormituspituus l_y lasketaan samasta kaavasta, mutta kuormatapauksessa c kuormituspituudeksi l_y valitaan pienin kaavassa 37 tulevista arvoista. (1, s. 212; 2, s. 30.)

Tehollinen kuormituspituus l_y kuormatapauksissa a ja b lasketaan kaavalla 34 (2, s. 30).

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad \text{KAAVA 34}$$

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad \text{KAAVA 35}$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{jos } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = 0 \quad \text{jos } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad \text{KAAVA 36}$$

Tehollinen kuormituspituus l_y kuormatapauksessa c lasketaan kaavalla 37 (2, s. 30).

$$l_y = \min\left(l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2} + m_2, l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2}, \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{y_w} h_w} \leq s_s + c\right) \text{ KAAVA 37}$$

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{y_w} h_w} \leq s_s + c$$

c = pistekuorman etäisyys palkin tukemattomasta päädystä (mm)

2.5 Yhteisvaikutukset

2.5.1 Taivutus ja leikkaus

Leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyteen on otettava huomioon. Jos leikkausvoima on pienempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä, sen vaikutus taivutusmomenttikestävyteen voidaan jättää huomioon ottamatta paitsi, jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyttä. Kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä, leikkausvoiman takia pienennetty plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea I-profiilin tapauksessa, jossa laipat ovat yhtä suuret ja taivutus vaikuttaa vahvemman akselin suhteen kaavasta 38 (3, s. 57.)

Pienennetty taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta 38 (3, s. 57).

$$M_{y,V,Rd} = \left(\frac{W_{pl,y} \frac{\rho A_w^2}{4 t_w}}{\gamma_{M0}} \right) f_y \quad \text{mutta } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd} \quad \text{KAAVA 38}$$

Taivutuskestävyyden laskennassa tarvittava pienennetty myötöraja lasketaan kaavasta 39 (3, s. 57).

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad \text{KAAVA 39}$$

$V_{pl,Rd}$ = plastisen leikkauskestävyyden mitoitusarvo (N)

$W_{pl,y}$ = plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (kaava 40)

A_w = uuman pinta-ala (mm²)

Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys $W_{pl,y}$ lasketaan kaavasta 40 (1, s. 117).

$$W_{pl,y} = A_f(h_w + t_f) + \frac{h_w A_w}{4}$$

KAAVA 40

A_f = laippojen pinta-ala (mm²)

t_f = laipan paksuus (mm)

Jos leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä ja poikkileikkaus on mitoitettu niin, että laipat pystyvät yksinään kantamaan vaikuttavan taivutusmomentin (eli $M_{Ed} \leq M_{f,Rd}$), taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida. Muuten taivutuksen ja leikkauslommahduksen yhteisvaikutus täytyy huomioida, jos z-akselin suuntainen leikkausvoima ylittää puolet luvun 2.3 leikkauslommahduskestävyyden uuman osuudesta, eli jos $V_{Ed} > 0,5V_{bw,Rd}$. Yhteisvaikutusehdosta ratkaisusta lausekkeesta (kaava 41) voidaan laskea pienennetty taivutuskestävyys y-akselin suhteen, kun leikkausvoima vaikuttaa vain z-suunnassa. (1, s. 178.)

Poikkileikkauksen pienennetty taivutuskestävyys lasketaan kaavasta 41 (1, s. 180).

$$M_{y,V,Rd} = M_{f,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{f,Rd})(1 - \rho_{bw})$$

KAAVA 41

$$\rho_{bw} = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1 \right)^2$$

$M_{f,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon (Nmm)

$M_{pl,Rd}$ = koko poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys (Nmm) (kaava 42)

$V_{bw,Rd}$ = uuman osuus leikkaus leikkauslommahduskestävyydestä (N)

Plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys $M_{pl,Rd}$ lasketaan kaavasta 42 (3, s. 53).

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$$

KAAVA 42

2.5.2 Taivutusmomentti ja pistekuorma

Tämä tarkastelu tehdään poikittaisen voiman, taivutusmomentin ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutusehdolla, missä normaalivoima valitaan nollassi, koska normaalivoimaa ei esiinny tässä tapauksessa. Yhteisvaikutus ehto (kaava 43) on tarkoitettu ainoastaan pistemäiselle poikittaiselle voimalle, joka vaikuttaa puristetun laipan kautta. (2, s. 32.)

Taivutusmomentin ja pistekuorman yhteisvaikutusehto tarkistetaan kaavalla 43 (2, s. 32).

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4$$

KAAVA 43

missä

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{W_{eff}f_y/\gamma_{M0}} \leq 1,0$$

2.6 Jäykisteet

2.6.1 Päätyjäykisteet

Päätyjäykisteet jaetaan jäykkiin ja ei-jäykkiin päätyjäykisteisiin. Luvussa 2.2 kuvassa 6 on esitetty jäykkä ja ei-jäykkä päätyjäykiste. Jäykkä päätyjäykiste koostuu kahdesta kaksipuoleisesta jäykisteestä, jotka muodostavat lyhyen palkin laipat. Jäykisteiden välinen uuman osa muodostaa lyhyen palkin uuman. Jäykkä päätyjäykiste toimii lyhyenä palkkina, joka mitoitetaan omalla taivutuskestävyydellään vastaanottamaan uuman tasossa pituussuunnassa vaikuttavat veto- ja puristusvoimat. (1, s. 248.)

Kun jäykkä päätyjäykiste tehdään sileästä lattateräksestä, edellä mainittu vaatimus täyttyy kun kaavojen 44 ja 45 ehdot ovat voimassa (3, s. 248.).

$$A_{st} \geq 4h_w \frac{t_w^2}{e}$$

KAAVA 44

$$e \geq 0,1h_w$$

KAAVA 45

A_{st} = yhden kaksipuoleisen jäykisteen poikkipinta-ala, jolloin pinta-alaan laske-
taan mukaan uuman molemmilla puolilla oleva osuus sekä jäykisteiden väliin
jäävä uuman levyosa, jonka leveys on t_s (mm²)

e = jäykisteiden keskilinjojen välinen etäisyys (mm)

Jäykkä päätyjäykiste toimii myös tukireaktiota vastaanottavana jäykisteenä tuel-
la. Käytännössä tukireaktion kantaa sisempi jäykiste jäykän päätyjäykisteen
kahdesta kaksipuoleisesta jäykisteestä (kuva 6), joka mitoitetaan tukireaktiolle.
(1, s. 248.)

Mikäli päätyjäykiste ei täytä kaavoissa 44 ja 45 olevia ehtoja, se on ei-jäykkä
päätyjäykiste (kuva 6c). Ei-jäykkä päätyjäykiste voi olla kuvan 6c kohdan mu-
kainen kaksipuoleinen päätyjäykiste, mutta sen tulee täyttää jäykkiä välijäykis-
teitä koskevat jäykkyysvaatimukset (kaava 46.) Ei-jäykät päätyjäykisteet ja jäyk-
kien päätyjäykisteiden sisemmät jäykistelevytyt mitoitetaan aksiaalivoimille, jotka
aiheutuvat palkin tukireaktiosta. (1, s. 249.)

Poikittaisjäykisteiden ja ei-jäykkien päätyjäykisteiden jäykkyys ehdot tarkistetaan
kaavasta 46 (2, s. 36).

$$I_{st} \geq 1,5h_w^3 \frac{t_w^3}{a^2}, \quad \text{kun } \frac{a}{h_w} < \sqrt{2}$$

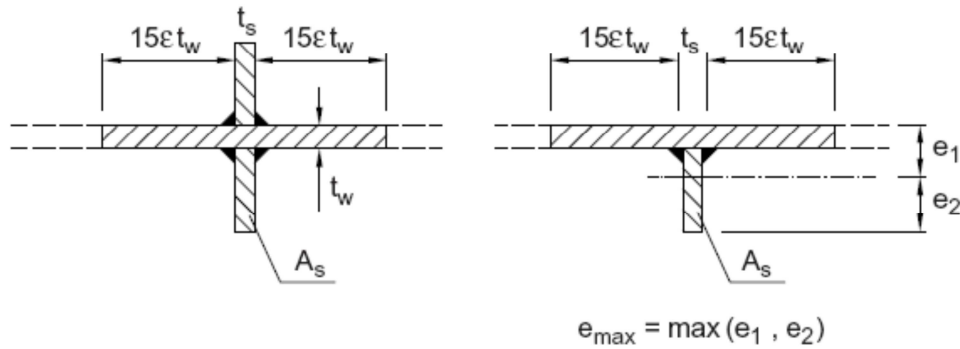
$$I_{st} \geq 0,75h_w t_w^3, \quad \text{kun } \frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}$$

KAAVA 46

a = jäykisteen viereisen levykentän pituus (mm)

2.6.2 Poikittaiset välijäykisteet

Myös poikittaiset välijäykisteet luokitellaan jäykkiin ja ei-jäykkiin jäykisteisiin. Jos
poikittaisjäykisteet täyttävät luvussa 2.6.1 kaavan 46 mukaiset ehdot, se luoki-
tellaan jäykäksi. Mikäli se ei täytä niitä, ohjeet ja kaavat leikkauslommahdusker-
toimen laskemiseksi eivät pidä paikkaansa. Poikittaisen välijäykisteen neliömo-
mentti lasketaan profiilin pituusakselin suuntaisen suoran suhteen (profiilin x-
akseli) taivutukselle uuman tasosta poispäin. Jäykisteeseen liittyvät uuman vie-
reiset levyosat lasketaan tässä jäykisteeseen mukaan (kuva 9). Sauvan päissä
levyosien leveys rajoitetaan niiden todelliseen mittaan. (1, s. 250.)



KUVA 9. Jäykisteeseen mukaan otettavien viereisten levyosien tehollinen pinta-ala (1, s. 242)

2.6.3 Jäykisteiden kestävyys

Poikittainen välijäykiste tai päätyjäykiste ei saa itse menettää stabiiliuttaan vääntönurjahtamalla. Tämä sääntö koskee yleisesti sekä poikittaisjäykisteitä että pitkittäisjäykisteitä. Avoimista poikkileikkauksista tehtyjen jäykisteiden bruttopoikkileikkauksen tulee tällöin täyttää kaavan 47 mukainen ehto. Tarkastessa ehtoja on huomattava, että jäykisteeseen ei oteta mukaan kuvan 9 mukaisia uuman viereisiä levyosia. (1, s. 243.)

Ehto vääntönurjahtamiselle tarkistetaan kaavalla 47 (1, s. 243).

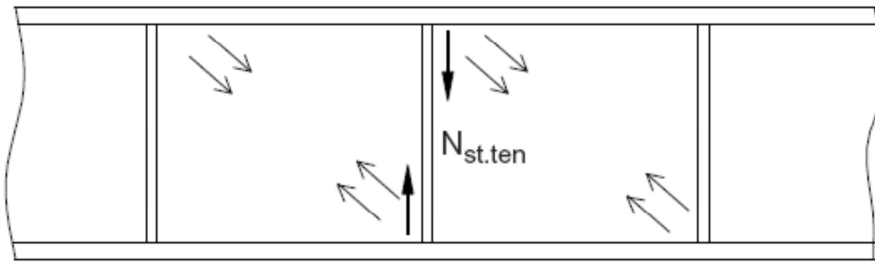
$$\frac{I_t}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E}$$

KAAVA 47

I_t = pelkän jäykisteen vääntöneliömomentti (mm^4)

I_p = pelkän jäykisteen polaarinen nelimomentti levyyn kiinnitetyn reunan suhteen (mm^4)

Jäykkien poikittaisjäykisteiden kestävyys voidaan mitoittaa aksiaaliselle mitoitusvoimalle, joka muodostuu vetokenttäteorian mukaisen kalvojännityksen pysyvykomponentista (kuva 10), jonka suuruus on kaavan 48 mukainen. Jos kaavasta 48 saatava arvo on negatiivinen, $N_{st,ten}$ valitaan nolaksi. (1, s. 250.)



KUVA 10. Poikittaisessa välijäykisteessä vaikuttava aksiaalivoima, joka aiheutuu uuman leikkausvoimista ja niiden vetokenttäteorian mukaisesta kalvojännityksen pystykomponentista (3, s. 250)

Vetokenttäteorian mukaisen kalvojännityksen pystykomponentti lasketaan kaavasta 48 (1, s. 250).

$$N_{st.ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad \text{KAAVA 48}$$

Poikittaisjäykisteen nurjahduskestävyys ja poikkileikkauksen kestävyys tarkastetaan aksiaalikuormille, jotka aiheutuvat seuraavista tekijöistä:

- profiilin uuman leikkausvoimasta muodostuvan vetokenttäteorian mukaisen kalvojännityksen pystykomponentista $N_{st.ten}$
- mahdollisen jäykisteen kohdalla vaikuttavasta pistekuormasta
- tuen kohdalla tukireaktiosta. (1, s. 251.)

Jäykisteen poikkileikkauksen kestävyys lasketaan tavanomaisilla puristuskestävyyden kaavoilla, joita tässä ei esitetä. Jäykisteeseen liittyvät uuman viereiset levyosat (kuva 9) lasketaan tässä jäykisteeseen mukaan, mutta sauvan päissä levyosien leveys rajoitetaan niiden todelliseen mittaan. Symmetrisen kaksipuoleisen jäykisteen tapauksessa jäykisteen tasonurjahduskestävyyttä laskettaessa käytetään nurjahduskäyrää c. Nurjahduspituuden L_{cr} arvoksi valitaan vähintään $0,75h_w$, kun jäykisteen molemmat päät kiinnitetään sivusuunnassa. Välijäykisteet mitoitetaan kaavalla 49 ja päätyjäykisteet kaavalla 50. (1, s. 252.)

Mitoitusehto poikittaisille jäykisteille tarkistetaan kaavalla 49 (1, s. 252).

$$F_{Ed} + N_{st.ten} \leq N_{st.c.Rd}$$

KAAVA 49

F_{Ed} = jäykisteen kohdalla vaikuttava pistekuorman tai tukireaktion mitoitusarvo murtorajatilassa (N)

$N_{st.c.Rd}$ = jäykisteen poikkileikkauksen kestävyys (N)

$N_{st.ten}$ = profiilin uuman leikkausvoimasta muodostuva vetokenttäteorian mukaisen kalvojännityksen pystykomponentti (N)

Mitoitusehto päätyjäykisteille tarkistetaan kaavalla 50 (1, s. 252).

$$F_{Ed} \leq N_{st.c.Rd}$$

KAAVA 50

2.7 Taipuma

Poikkileikkaukseltaan muuttuvan palkin taipumalle ei ole johdettu yleisiä kaavoja taipuman laskenta ei onnistu suoran palkin kaavoilla, koska palkin neliömomentti I muuttuu jatkuvasti. Taipuman määrittämiseen käytetään **Mohrin** menetelmää, jossa taipuma määritetään sauvanpääkiertymien ja suhteellisten taipumien y'' avulla (kaavat 51 ja 52).

Taipuman laskennassa palkkia kuormitetaan momentin ja taivutusjäykkyyden suhteella ja tämän kuormituksen aiheuttaman "momentin" M_c perusteella voidaan määrittää taipuma y_c . Harjapalkin taipuman laskemiseksi on palkki jaettava pieniin osiin, jotta kyetään laskemaan jokaisen pienen palkin osan neliömomentti ja taivutusmomentti erikseen. Taipuman laskemisen monimutkaisuuden vuoksi taipuma lasketaan vain palkin keskelle ja käyttäen tasaista kuormitusta. Tästä syystä tässä tehty taipuman laskenta antaa vain arvion taipumasta. (7, s.752.)

Palkin suhteellinen taipuma y'' lasketaan kaavalla 51 (7, s. 752).

$$y'' = \frac{M_x}{EI_x}$$

KAAVA 51

Sauvanpään kiertymä palkin päässä A lasketaan kaavasta 52 (7, s 752).

$$\varphi_A = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{M_x}{EI_x} (L - x) dx$$

KAAVA 52

M_x = palkilla oleva taivutusmomentti kohdassa x (Nmm)

EI_x = palkin jäykkyys kohdassa x (Nmm²)

Taipuma palkin keskellä lasketaan kaavasta 53 (7, s. 752).

$$y_c = \varphi_A * \frac{L}{2} - \sum_{n=1}^{10} y_n'' * r$$

KAAVA 53

r = tarkasteltavan kohdan ja palkin keskikohdan välinen etäisyys (mm)

y_n'' = tarkasteltavan palkin osan suhteellinen momentti

3 LASKENTAPOHJA

Tavoitteena oli tehdä Mathcad-laskentapohja, joka laskee mitoittavat rasitukset, ja mitoittaa rasitusten perusteella teräksisen nivelellisesti tuetun ohutuomaisen harjapalkin Eurokoodien ohjeiden mukaan. Vaikka kyseessä on harjapalkin laskentapohja, sillä voidaan laskea myös suorja palkkeja. Laskentapohjan tekemisen yksi tärkeä tavoite oli myös se, että laskentaa pystyttäisiin seuramaan. Tavoitteena oli myös tehdä pohja, jossa suunnittelija päättää mitoittavat kuormitusyhdistelyt ja päättää myös joitakin laskentapohjalle syötettäviä arvoja, vaikka ne voitaisiin määrätä valmiiksi. Tästä syystä suunnittelijan tulee olla tietoinen, mitä lasketaan.

Opinnäytetyössä laadittu laskentapohja on hyvin pitkä, koska kaikki kaavat on syötetty erikseen ja ne on otsikoitu selvyiden vuoksi. Eri kaavoja olisi voinut merkitä yhden kaavan alle ja laskentapohjasta tulisi huomattavasti lyhyempi, mutta oli tietoisesti päätetty, että laskentapohjasta tehtäisiin selkeä.

3.1 Laskentapohjan toimintaperiaate

Laskentapohjan toimintaperiaate perustuu ehtoyhtälöihin. Eli laskentapohja on itse asiassa ohjeissa olevien kaavojen syöttämistä ja niiden keskinäisten ehtojen toteuttamista. Laskentapohja perustuu Eurokoodien antamiin rajauksiin ja rasitusten ja kestävyysien suhteisiin eli käyttöasteisiin. Kuvassa 11 on esitetty muutamia käyttöasteita.

$$\text{Taivutusmomenttikestävyys: } \eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\text{Pisekuormakestävyys: } \eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0$$

$$\text{Leikkauskestävyys: } \eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

KUVA 11. Käyttöasteita

Laskennan aluksi tarkistetaan rajaukset, jotta mitoitus voidaan tehdä ohjeissa olevilla kaavoilla. Sen jälkeen lasketaan kestävyys ja etsitään suurin käyttöaste. Mikäli käyttöaste on yli ykkösen tai muun raja-arvon, laskentapohja ilmoittaa virheestä. Kuvassa 12 on esitetty ehtoyhtälöiden toimintaa. Vaikka jokin käyttöaste menisi yli raja-arvon tai muu ehto ei täyttyisi, laskentaa ei pysäytetä. Pohjaan tulee ilmoitus virheestä, kuten "VIRHE, TAIVUTUSKESTÄVYYS EI RIITÄ." Laskentapohja siis täytyy käydä kokonaisuudessaan läpi, jotta jokainen kohta tulee tarkastettua. Jokaiselle kaavalle, ehdolle ja rajaukselle on mainittu lähde laskentapohjan oikeassa reunassa, jotta voidaan tarkistaa kunkin asian oikeellisuus.

$$\text{Kestävyys}_{\text{taivutus}} = \text{if} \left(\frac{M(m_t)}{M_{c.Rd}(m_t)} \leq 1, \text{"OK"} , \text{"VIRHE, TAIVUTUSKESTÄVYYS EI RIITÄ"} \right)$$

Kestävyys_{taivutus} = "VIRHE, TAIVUTUSKESTÄVYYS EI RIITÄ"

KUVA 12. Ehtoyhtälö

Laskentapohjassa on kolmenvärisiä laatikoita, joihin suunnittelijan tulee kiinnittää huomiota. Keltaisiin laatikoihin tulee syöttää arvo ja sinisistä laatikoista nähdään laskujen vastausten lukuarvoja tai muita huomioita. Punaisista laatikoista nähdään, onko laskennassa tapahtunut virhe vai voidaanko laskentaa jatkaa. Pohjassa on myös keltaisella värillä olevia laatikoita, joista käyttäjän tulee valita oikea arvo. Kuvassa 13 on esimerkki neljästä erityyppisestä kohdasta.

$L_{\text{wv}} := 25\text{m}$

Palkin pituus/Jänneväli

Valitse mitoittava kuormitusyhdistely

Kuormitusyhdistely :=

Ky1
Ky2
Ky3
Ky4
Ky5

Käyttöaste = 0.719

käyttöaste_{leikkaus} = "OK"

KUVA 13. Laskentapohjan kohdat, joihin tulee kiinnittää huomioita

3.2 Laskentapohjan rajaukset

Aluksi työtä rajattiin siten, että kyseessä on nivelellisesti tuettu yksiaukkoinen harjapalkki, jota käytetään ainoastaan kattopalkkina. Harjapalkin kaltevuudelle standardi SFS-EN 1993-1-5 antaa rajaukset, jotta voidaan käyttää yleisiä mitoituskaavoja.

Kattopalkille tulee harvoin vaakakuormia, joten vaakakuormia tässä laskentapohjassa ei lasketa. Jatkuviksi kuormiksi otettiin omapaino, lumikuorma ja tuulikuorma. Palkille voi myös laittaa yhden jatkuvan pysyvän kuorman, joka voi olla palkkia lyhyempi. Lisäksi lasketaan kaksi pysyvää pistekuormaa. Kuormitusyhdistelyt tehdään SFS-EN 1990 ja Suomen kansallisen liitteen mukaisilla kuormitusyhdistelyillä.

Teräksen lujuudeksi voidaan antaa vain 235–460 MPa, koska korkealujuusteräokset soveltuvat vain rajoitetusti plastisuusteorian mukaiseen mitoitukseen. Lisäksi laipan leveyttä on rajoitettu siten, että shear-lag ilmiötä ei pääse tapahtumaan. Palkin jäykisteiden mitoitusta rajattiin siten, että palkille voi laittaa ainoastaan poikittaisia jäykisteitä. Pitkittäisjäykisteitä ei tämä laskentapohja laske.

Käyttörajatilassa tarkistetaan ainoastaan palkin taipuma keskellä. Palkin taipuman laskenta poikkileikkaukseltaan muuttuville profiileille on haastava, koska valmiiksi johdettuja kaavoja ei ole. Tässä laskentapohjassa laskettu taipuman arvo ei ole taipuman maksiarvo, koska poikkileikkaukseltaan muuttuvan palkin suurin taipuma ei ole palkin keskellä. Toiseksi laskentaa yksinkertaistettiin siten, että käyttörajatilan kuormista aiheutuneen suurimman taivutusmomentin perusteella muodostettiin yksi jatkuva kuorma, josta oli hieman helpompi määrittää

taipuma palkin keskelle. Laskettu taipuman arvo on siis vain arvio todellisesta taipumasta. Taipuman laskenta oli järkevä rajata, koska taipuma pystytään määrittämään myös muilla laskentaohjelmilla.

Kiepahduksen laskennassa on huomioitava, että kiepahdusta estävät kiepahdustuet kestävät. Laskentapohja ei määrittele kiepahdustuentojen kestävyyttä, vaan sille syötetään kiepahdustuennanväli ja pohja olettaa, että kiepahdustuet kestävät ja pysyvät paikallaan. Suunnittelijan tulee tarkistaa kiepahdustukien kestävyys.

Laskentapohja ei mitoita uuman ja laipan välisiä hitsejä. Hitsin a-mitta annetaan laskentapohjalle, jotta pystytään laskemaan tarvittavat poikkileikkaussuureet, mutta varsinaista hitsin mitoitusta ei tehdä. Palkkiin mahdollisesti tulevia reikiä ja aukkoja laskentapohja ei huomioi.

3.3 Laskentapohjan toteutus

Laskentapohjan tekeminen alkoi tutustumalla teräksisen ohutuumaisen harjapalkin mitoitukseen. Aluksi täytyi käydä läpi kaikki ilmiöt, jotka vaikuttivat sen mitoitamiseen. Aikaa kului erityisesti harjapalkin taipuman laskennan opetteluun.

Kun oli saatu selville, mitä asioita pitää ottaa huomioon ohutuumaista harjapalkkia mitoittaessa, täytyi alkaa selvittää kuormitusyhdistelmiä. Kuormitusyhdistelyt tehtiin EN 1990 ja Suomen kansallisen liitteen mukaisilla määräyksillä. Tämän jälkeen määritettiin varsinaiset kuormat. Palkille voi laittaa kuormituksina omanpainon, lumikuorman ja tuulikuorman, mitkä ovat jatkuvia koko palkin matkalla. Kuormitukseksi palkille voi laittaa myös yhden pysyvän jatkuvan kuorman, joka voi olla lyhyempi kuin varsinainen palkki. Lisäksi laskentapohja laskee kahden pysyvän pistekuorman vaikutuksen. Näillä pohjatiedoilla lähdettiin muodostamaan laskentapohjaa.

3.3.1 Mitoitustarkastelut

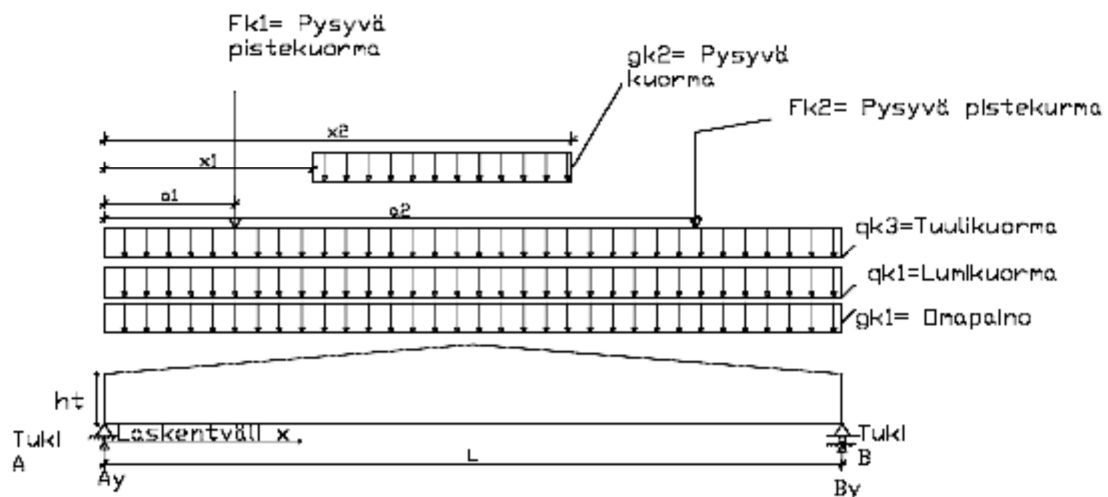
Laskentapohjassa tehdään kaikki vaadittavat mitoitustarkastelut SFS-EN 1993-1-1:n ja SFS-EN 1993-1-5:n mukaan. Kuormitusyhdistelyt tehdään SFS-EN

1990 ja Suomen kansallisen liitteen mukaisilla kaavoilla. Mitoitustarkastelussa tarkistetaan seuraavat asiat:

- taivutuskestävyys
- leikkauskestävyys
- taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus
- pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus
- pistekuormakestävyys
- poikittaisjäykisteiden kestävyys pistekuormalle
- päätyjäykisteiden kestävyys.

3.3.2 Rakennemalli ja kuormitusyhdistelyt

Kuvassa 14 on esitetty laskentapohjassa olevan harjapalkin rakenne- ja kuormitusmallia.



KUVA 14. Rakenne- ja kuormitusmalli

Murtorajatilan kuormitusyhdistelyt tehdään SFS-EN 1990:n mukaisesti. Kuormitusyhdistelyitä tehdään myös SFS-EN 1990 Suomen kansallisen liitteen mukaisesti. SFS-EN 1990 mukainen kuormitusyhdistely on kohtuuttomasti varmallaa

puolella, joten on järkevää käyttää kansallisen liitteen mukaisia kuormitusyhdistelyitä. Laskentapohja laskee yhteensä viisi eri kuormitusyhdistelyä ja niistä valitaan määräävin yhdistely. Kuormitusyhdistelyitä on siis kolme Suomen kansallisen liitteen mukaista yhdistelyä ja kaksi SFS-EN 1990 mukaista yhdistelyä (kaavat 54, 55 ja 56.) (1, s. 72 - 73; s. 88; 9, s. 4.)

Kuormitusyhdistelyt, joihin on laitettu osavarmuuslukujen lukuarvot, lasketaan kaavalla 54 tai vaihtoehtoisesti kaavoilla 55 ja 56 (1, s. 72-73; s. 88; 9, s. 4).

$$6.10: 1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 1,5 * K_{FI} * Q_{,1} + 1,5 * K_{FI} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 54}$$

$$6.10a: 1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} \quad \text{KAAVA 55}$$

$$6.10b: 1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 1,5 * K_{FI} * Q_{,1} + 1,5 * K_{FI} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 56}$$

j = pysyvän kuorman indeksi

i = muuttuvan kuorman indeksi

G_{kj} = pysyvän kuorman j ominaisarvo

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

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

$\psi_{Q,i}$ = muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

K_{FI} riippuu seuraamusluokasta seuraavasti:

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

Käyttörajatilassa tarkistetaan ainoastaan taipuma, joten käyttörajatilan kuormitusyhdistelyinä käytetään ominaisyhdistelmää (kaava 57). Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmistä tulee vain kaksi yhdistelmää ja laskentapohja valitsee itse määräävämmän suuremman jatkuvan kuorman perusteella. Käyttörajatilan maksimikuorma lasketaan kuormituksista tulevan maksimimomentin perusteella.

Ominaisyhdistelmä lasketaan kaavalla 57 (4, s. 36).

$$\sum_{i \geq 1} G_{kj} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,j}$$

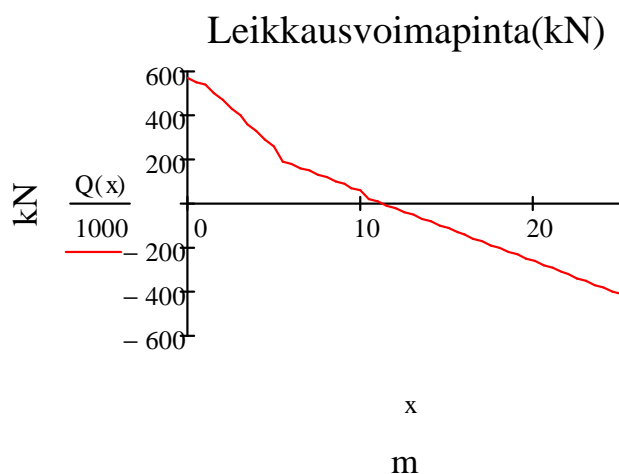
KAAVA 57

3.3.3 Taivutusmitoitus

Murto-rajatilan kuormitusyhdistelmästä saadaan määräävät arvot jatkuvalle kuormalle P_d , pistekuormille F_{d1} , F_{d2} ja palkkia lyhyemmälle jatkuvalle kuormalle P_{d1} . Kuormista lasketaan kustakin erikseen statiikan sääntöjen perusteella leikkausvoiman ja taivutusmomentin arvot x :n funktiona. Lopuksi kustakin kuormituksesta muodostuneet rasitusten lausekkeet yhdistetään käyttämällä superpositioperiaatetta.

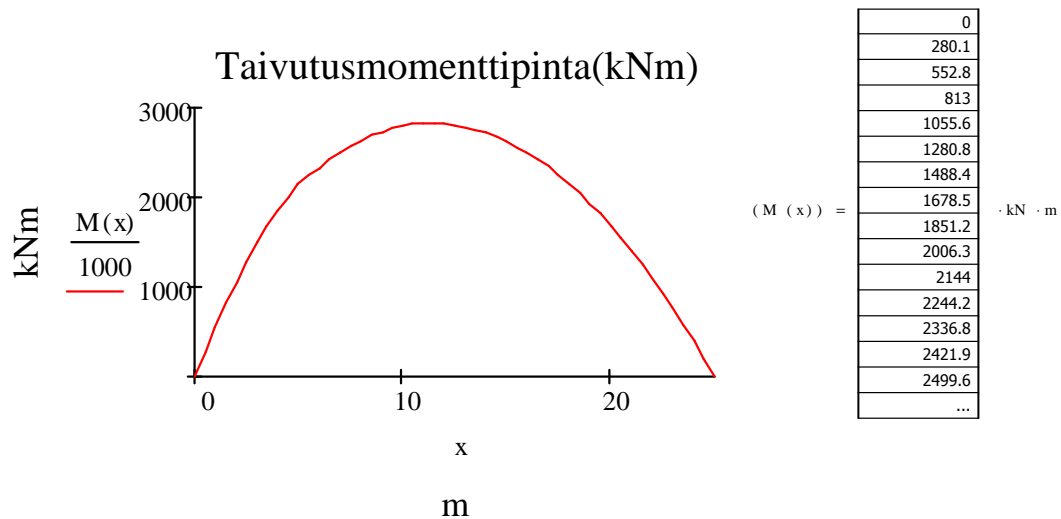
Taivutusmomentti- ja leikkausvoimapinta piirretään kuvaajaksi laskentapohjaan. Kaikki laskentapohjassa olevat kestävyystarkastelut perustuvat kokonaan tai osittain leikkausvoimaan tai taivutusmomenttiin. Kuvassa 15 on esitetty murto-rajatilan kuormitusyhdistelystä muodostuneet leikkausvoima- ja taivutusmomenttipinnat.

Rasituspinnat



567.8
552.8
537.8
502.8
467.8
432.8
397.8
362.8
327.8
292.8
257.8
192.8
177.8
162.8
147.8
...

$Q(x) =$ $\cdot \text{kN}$



KUVA 15. Rasituspinnat

Taivutuskestävyys lasketaan tehollisen poikkileikkauksen perusteella, koska tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vain poikkileikkausluokaltaan 4 olevaa palkin uumaa. Tehollisessa poikkileikkauksessa palkin uumasta otetaan pala pois ja sen jälkeen lasketaan palkin neliömomentti I_{eff} ja taivutusvastus W_{eff} suurimman reunaetäisyyden perusteella. Neliömomentin ja taivutusvastuksen laskentaan täytyy huomioida painopisteen siirtyminen. Painopisteen siirtyminen aiheuttaa myös sen, että tehollisten poikkileikkaussuureiden I_{eff} ja I_{eff} laskenta on iteratiivista. Kuvassa 16 on esitetty palkin keskelle laskettuja poikkileikkaussuureita ja niiden muutosta toisen laskentakierroksen jälkeen.

Jännityssuhde

$$\psi\left(\frac{L}{2}\right) = -1$$

Ensimmäisen laskentakierroksen tulokset

Tehollinen nelimomentti $I_{\text{eff}}\left(\frac{L}{2}\right) = 270117.3 \cdot \text{cm}^4$

Tehollinen taivutusvastus: $W_{\text{eff.c}}\left(\frac{L}{2}\right) = 5207.7 \cdot \text{cm}^3$

Uusi jännityssuhde

$$\psi_1\left(\frac{L}{2}\right) = -0.925$$

+

Toisen laskentakierroksen tulokset

Tehollinen nelimomentti $I_{\text{eff.1}}\left(\frac{L}{2}\right) = 268524.9 \cdot \text{cm}^4$

Tehollinen taivutusvastus: $W_{\text{eff.c.1}}\left(\frac{L}{2}\right) = 5160.8 \cdot \text{cm}^3$

Tehollisen taivutusvastuksen muutos

$$1 - \frac{W_{\text{eff.c.1}}\left(\frac{L}{2}\right)}{W_{\text{eff.c}}\left(\frac{L}{2}\right)} = 0.009$$

Muutos on pieni, laskenta voidaan jättää tähän.

KUVA 16. Taivutusvastuksen iterointia

Tulokset näyttävät suppenevan nopeasti, joten iterointia ei ole syytä jatkaa. Taivutusvastus muuttuu todella vähän. Toisen laskentakierroksen jälkeen taivutusvastuksen muutos on alle prosentin. Tästä syystä laskentapohjaan ei tehdä poikkileikkaussuureiden iterointia. Iterointi, johon liittyy paljon eri funktioita, hidastaa myös merkittävästi laskentapohjan toimintaa.

Taivutuskestävyyttä verrataan palkin taivutusmomenttiin ja näin saadaan taivutuskestävyyden käyttöaste. Laskentapohjaan piirretään kuvajaa, jossa yhtälönä on taivutusmomentin suhde taivutuskestävyyteen. Tämä yhtälö derivoidaan

ja matematiikan sääntöjen perusteella funktion ääriarvot saadaan derivaatan nollakohdista. Maksimikäyttöaste on siis derivaatan nollakohdassa.

3.3.4 Kiepahdus

Kiepahduksen laskennassa suunnittelijan on oltava perehtynyt palkin toimintaan, kuormitukseen ja kiinnityksiin, koska laskentapohjaan tulee syöttää useita niihin liittyviä arvoja. Oli tarkoituksenmukaista, että edellä mainittuja arvoja ei annettaisi valmiiksi, koska suunnittelijan täytyy itse arvioida syötettävien termien arvot. Suunnittelijan tulee arvioida palkin tuen laakerointia sekä kuormituksen aiheuttaman momenttipinnan muotoa, jotta voidaan syöttää kuvassa 17 olevat kertoimet. Suunnittelijan täytyy myös arvioida kiepahdustuentojen kiinnitystä, koska tämä laskentapohja ei laske niiden kiinnityksiä.

$L_{cr} := 2.5m$	Palkin sivusiirtymän estävien pisteiden välimatka
$k_z := 1$	kiepahdustekijät
$k_w := 1$	
$C_1 := 1.132$	Momentin jakaantumiskerroin
$C_2 := 0.459$	Kuormitustapakerroin
$C_3 := 0.525$	Poikkileikkauksen asymmetriakerroin

KUVA 17. Kiepahduskestävyyden laskentaan liittyvät kertoimet

3.3.5 Leikkauslommahdus

Leikkauslommahduksen huomioiminen laskennassa oli melko monimutkainen. Jotta leikkauslommahdus voidaan laskea, täytyy ennen laskentaa tehdä useita eri valintoja. Leikkauslommahduksen laskemiseksi laskentapohjassa voi valita valintalaatikoista haluttuja jäykistämistapoja ja jäykisteiden jäykkyyksiä, vaikka laskentapohjan lopussa tarkistetaan erikseen jäykisteiden jäykkyydet ja kestävyudet. Tällainen järjestely tehtiin, koska laskentaa pyritään selventämään. Suunnittelija tekee valintansa leikkauslommahduskestävyyden yhteydessä,

mutta joutuu tarkistamaan laskentapohjan lopussa olevilla laskelmilla valittujen jäykisteiden jäykkyyden. Jäykisteiden valintaa on havainnollistettu kuvassa 18.

The image shows four separate dropdown menus, each with a yellow background and a white selection box. The first menu is labeled 'Päätyjäykiste :=' and has 'Kyllä' selected. The second is 'Pääty :=' with 'Jäykkä' selected. The third is 'Uma :=' with 'Poikittaisjäykisteet' selected. The fourth is 'Uumajäykiste :=' with 'Jäykkä' selected.

Päätyjäykiste :=	Kyllä Ei
Pääty :=	Jäykkä Ei-jäykkä
Uma :=	Poikittaisjäykisteet Ei poikittaisjäykisteitä
Uumajäykiste :=	Jäykkä Ei-jäykkä

KUVA 18. Jäykisteiden valinta

Leikkauslommahduksen laskennassa tarvittavien suureiden laskentaan joudutaan käyttämään paljon erilaisia ehtoyhtälöitä, ja siksi kaavoista tuli monimutkaisia. Oli haastavaa yrittää saada kaikki eri mahdolliset tapaukset saman kaavan sisään. Oli vaikea saada toteutettua Mathcadilla lausekkeita, joihin täytyi sisällyttää useampia ehtoja. Esimerkiksi leikkauslommahduskertoimen laskennassa täytyi huomioida useita eri vaihtoehtoja (kuva 19).

$$k_T(x) := \begin{cases} \left[5.34 + 4.0 \cdot \left(\frac{h_W(x)}{a_S} \right)^2 \right] & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} \geq 1 \wedge U_{\text{umajäykiste}} = 1 \right) \right) \\ \left[4.00 + 5.34 \left(\frac{h_W(x)}{a_S} \right)^2 \right] & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} < 1 \wedge U_{\text{umajäykiste}} = 1 \right) \right) \\ 5.34 & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} \geq 1 \wedge U_{\text{uma}} = 2 \right) \right) \\ 4.00 & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} < 1 \wedge U_{\text{uma}} = 2 \right) \right) \\ 5.34 & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} \geq 1 \wedge U_{\text{umajäykiste}} = 2 \right) \right) \\ 4.00 & \text{if } \left(\left(\frac{a_S}{h_W(x)} < 1 \wedge U_{\text{umajäykiste}} = 2 \right) \right) \end{cases}$$

KUVA 19. Leikkauslommahduskertoimen laskenta

3.3.6 Yhteisvaikutukset

Yhteisvaikutusehdoissa tarkastellaan taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus sekä taivutusmomentin ja pistekuorman yhteisvaikutus. Lisäksi tarkastellaan pistekuorman ja leikkausvoiman yhteisvaikutus, vaikka sen tarkistusta ei edellytetä SFS-EN 1993-1-5, eikä sen laskentaa ole esitetty tässä raportissa. Pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus tehtiin pistekuorman, taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutusehdolla siten, että normaalivoima laitettiin nolaksi.

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksen suurimman käyttöasteen määrittäminen tuotti hieman hankaluuksia. Käyttöasteen kuvaaja on vaihteleva ja käyrässä saattaa olla epäjatkuvuuskohtia, mikä aiheuttaa sen, että laskentapohjassa käytetylle yhtälönratkaisijalle täytyi syöttää useita eri arvoja. Vaikka sille antoi useita eri arvoja, saattoi laskentaan syntyä virhe, koska ääriarvo voi sijaita myös yhtälön epäjatkuvuuskohtassa. Kuvassa 20 näkyvät tai-

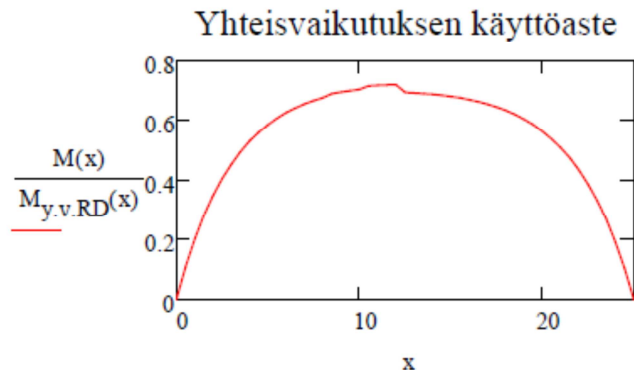
vutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksen käyttöasteen kuvaaja ja suurimman käyttöasteen ratkaisumenettely.

$$g_{vm}(x) := \frac{d}{dx} \frac{M(x)}{M_{y.v.RD}(x)}$$

Given

$$g_{vm}(x) = 0$$

$$\text{ratk}_{yht}(x) := \text{Find}(x)$$



$$\text{käyttöaste}_{yht} := \max \left(\frac{M\left(\text{ratk}_{yht}\left(\frac{L}{3}\right)\right)}{M_{y.v.RD}\left(\text{ratk}_{yht}\left(\frac{L}{3}\right)\right)}, \frac{M(\text{ratk}_{yht}(a_1))}{M_{y.v.RD}(\text{ratk}_{yht}(a_1))}, \frac{M(\text{ratk}_{yht}(a_2))}{M_{y.v.RD}(\text{ratk}_{yht}(a_2))} \right)$$

$$\text{käyttöaste}_{yht} = 0.72$$

$$\text{kestävyys}_{VM\text{yhteisvaikutus}} = \text{if}(\text{käyttöaste}_{yht} \leq 1, \text{"OK"}, \text{"VIRHE, KESTÄVYYS EI RIITÄ"})$$

$$\text{kestävyys}_{VM\text{yhteisvaikutus}} = \text{"OK"}$$

KUVA 20. Taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutus ja sen käyttöasteen ratkaisu

Kuvassa 20 olevaa menettelyä käytettiin myös muissa ääriarvojen etsinnässä. Tämä Mathcadin yhtälönratkaisumenettely on hieman hankala, koska sille täytyy antaa arvaus nollakohdan sijainnista ja se saattaa vaikeuttaa laskentaa. Yhtälönratkaisumenettely on erittäin hidas ja koko laskentapohjan toiminta on hidasta näiden vuoksi.

3.3.7 Pistekuormakestävyys

Pistekuormakestävyden tarkistuksessa tulee tietää pistekuorman tyyppi ja pistekuorman jakaantumispituus. Palkin tukireaktiot täytyy tarkastella pistekuormakestävyden kaavoilla, jos palkin päissä ei käytetä päätyjäykisteitä tai päädyssä olevat jäykisteet eivät täytä jäykkyyssehtoja. Tällöin tukireaktiota verrataan pistekuormakestävyteen tuella.

Pistekuormakestävyden laskenta on pitkä toimenpide, koska laskentaa joudutaan iteroimaan. Pistekuormakestävyden tarkistuksessa lasketaan palkin pistekuormakestävyden mitoitusarvo pistekuormien F_{d1} ja F_{d2} kohdissa. Jos laskentapohja ilmoittaa, että ”päätyjäykisteitä ei luokitella jäykisteiksi” tai laskentapohjaan valitaan palkille ”ei poikittaisjäykisteitä”, pistekuormakestävyden laskentaan tulee muuttaa pistekuorman vaikutustapaukseksi c ja jakaantumispituus uudestaan. Muuten laskentapohja osaa huomioida tukireaktion tarkistuksen tapauksessa c . Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan ainoastaan pistekuormia, jotka tulevat uumalle puristetun laipan kautta.

3.3.8 Jäykisteet

Jäykisteiden laskennassa voidaan tarkistaa vain yksi kaksipuolinen poikittaisjäykiste ja yksi kaksipuolinen päätyjäykiste kerrallaan. Laskentapohjassa on siis yksi laskentarutiini uuman poikittaisjäykisteelle ja yhdelle päätyjäykisteelle. Uuman poikittaisjäykisteen tarkistuksessa täytyy valita, kummalle pistekuormalle haluaa mitoittaa jäykisteen. Päätyjäykisteen tarkistuksessa voidaan tarkistaa jäykän päätyjäykisteiden yhteinen jäykkyys, mikäli käytetään kahta erillistä jäykistelevyä. Päätyjäykiste tarkistetaan pistekuormalle eli tukireaktiolle myös jäykän päätyjäykisteen tapauksessa.

Suunnittelijan tulee syöttää jäykisteen poikkileikkauksen mitat, myötöraja. Käytettäessä kahta jäykistelevyä päätyjäykisteenä jäykistelevyjen välinen etäisyys e . Mikäli ei käytetä kahta jäykistelevyä, laskentapohja osaa huomioida jäykistelevyjen välisen etäisyyden e laskelmissa, vaikka etäisyydeksi olisi annettu mikä tahansa lukuarvo. Tällainen menettely tehtiin siksi, että jäykistelevyjen väliseksi arvoksi ei voi laittaa nollaa, koska e on kaavan jakajana ja sen arvo ei voi olla

nolla. Jos käytetään ei-jäykkää päätyjäykistettä, tulee laskentapohjalle kuitenkin syöttää arvo $e1$, joka tarkoittaa jäykistelevyn etäisyyttä palkin päästä.

Jäykisteen tarkastelussa tarkastellaan jäykisteen vääntönurjahdus, poikkileikkausluokka, jäykkyys ja kestävyys pistekuormalle. Jäykisteen tulee kuulua vähintään poikkileikkausluokka 3:een.

3.3.9 Taipuma

Taipuman laskenta oli yksi haastavimmista asioista laskentapohjassa. Taipumaa ei voitu määrittää johdetuilla suoran palkin taipuman kaavoilla, koska kyseessä oli muuttuva poikkileikkaus. Harjapalkin taipuman määrittämiseen kului lukuisia tunteja ja lähdekirjallisuuttakin täytyi etsiä useaan otteeseen. Lopulta taipuman laskentaan päätettiin käyttää **Mohrin** menetelmää, jolla voitaisiin laskea tietyn pisteen taipuma poikkileikkaukseltaan muuuttuvalle palkille. Taipuman maksimiarvon määrittämiseen olisi mennyt liikaa aikaa, joten päätettiin, että lasketaan taipuma vain palkin keskelle. Taipuman likimääräiselle tarkastelulle oli perusteltu syy, koska taipuma voidaan helposti tarkastaa muilla ohjelmilla.

Mohrin menetelmä perustuu momentin ja taivutusjäykkyyden suhteesta muodostuneen momentin laskentaan. Palkkia kuormitetaan taivutusmomentin ja neliömomentin suhteella ja tämän kuormitukset aiheuttaman ”momentin” suhteella voidaan määrittää taipuma y_c halutussa kohdassa. Taipuman laskenta palkin keskelle on periaatteeltaan sama asia kuin palkin taivutusmomentin laskeminen palkin keskelle, mutta kuormitus on vain erilainen. Palkki jaetaan 20 osaan, joille jokaiselle osalle lasketaan erikseen taivutusmomentin ja neliömomentin suhde. Näitä kutsutaan palkin suhteelliseksi taipumaksi. Tämän jälkeen palkkia kuormittava kuormituspinta (taivutusmomentti/taivutusjäykkyys) integroidaan palkin läpi, mistä tulee sauvanpään kiertymä. Integraalista tuleva arvo kerrotaan palkin pituuden puolikkaalla ja tästä tulosta vähennetään kunkin osan suhteellinen momentti kerrottuna sen etäisyydellä palkin keskeltä palkin puoleen väliin asti. (Kuva 21.)

Suhteellinen taipuma

$$y''''(x) := \frac{M_{KRT}(x)}{E \cdot I_{eff.krt}(x)} \cdot \left(\frac{L}{20}\right)$$

Sauvanpään kiertymä tuella A

$$\varphi_A := \frac{1}{L} \int_0^L \frac{M_{KRT}(x)}{E \cdot I_{eff.krt}(x)} \cdot (L - x) dx$$

Taipuma palkin keskellä

$$y := \varphi_A \cdot \frac{L}{2} - y'''' \left(\frac{L}{40} \right) \cdot \left(\frac{L}{2} - 0.5 \cdot \frac{L}{20} \right) - y'''' \left(2 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{L}{20} \right) \right] \dots$$

$$+ \left[-y'''' \left(3 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{2L}{20} \right) \right] - y'''' \left(4 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{3L}{20} \right) \right] \dots \right]$$

$$+ \left[-y'''' \left(5 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{4L}{20} \right) \right] - y'''' \left(6 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{5L}{20} \right) \right] \dots \right]$$

$$+ \left[-y'''' \left(7 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{6L}{20} \right) \right] - y'''' \left(8 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{7L}{20} \right) \right] \dots \right]$$

$$+ \left[-y'''' \left(9 \cdot \frac{L}{20} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{8L}{20} \right) \right] - y'''' \left(\frac{L}{40} \right) \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{0.5 \cdot L}{20} + \frac{9L}{20} \right) \right] \right]$$

KUVA 21. Taipuman laskenta

3.3.10 Laskentapohjalle syötettävät lähtöarvot

Laskentapohjalle tulee syöttää paljon arvoja. Suunnittelijan tulee olla perehtynyt harjapalkin mitoittamiseen, koska laskentapohja ei pääte kaikkia arvoja. Laskentapohjaan syötettäviä arvoja ovat seuraavat:

Kuormitustiedot

- seuraamusluokasta johtuva kuormakerroin K_{Fi}
- omapainon ominaisarvo g_{k1}
- lumikuorman ominaisarvo q_{k1}

- tuulikuorman ominaisarvo q_{k3}
- palkilla oleva pysyvän jatkuvakuorman ominaisarvo g_{k2}
- palkilla oleva pysyvä jatkuvakuorma g_{k2} :n aloituspiste x_1
- palkilla oleva pysyvä jatkuvakuorma g_{k2} :n lopetuspiste x_2
- lumen yhdistelykertoimet $\Psi_{0.lumi}, \Psi_{1.lumi}$
- tuulen yhdistelykertoimet $\Psi_{0.tuuli}, \Psi_{1.tuuli}$
- pysyvän pistekuorman ominaisarvo F_{k1}
- pysyvän pistekuorman ominaisarvo F_{k2}
- pysyvä pistekuorman F_{k1} :n etäisyys palkin vasemmasta päädyistä a_1
- pysyvä pistekuorman F_{k2} :n etäisyys palkin vasemmasta päädyistä a_2 .

Palkin tiedot

- palkin pituus L
- laskentaväli
- palkin korkeus tuella h_t
- kaltevuus n ($1/n$)
- uumanpaksuus t_w
- ylälaipan paksuus $t_{f,y}$
- ylälaipan leveys $b_{f,y}$
- alalaipan paksuus $t_{f,a}$
- alalaipan leveys $b_{f,a}$
- hitsin mitta a .

Kiepahdus

- palkin sivusiirtymän estävien pisteiden välimatka L_{cr}
- kiepahdustekijät k_z ja k_w
- momentin jakaantumiskerroin C_1
- kuormitustapakerroin C_2
- poikkileikkauksen asymmetriakerroin C_3 .

Jäykisteet

- poikittaisjäykisteiden välinen etäisyys a_s
- jäykisteiden leveys, paksuus ja myötöraja
- jäykän päätyjäykisteen tapauksessa jäykistelevyjen välinen etäisyys e
- jäykistelevyn etäisyys e_1 palkin päädystä, kun käytetään ei-jäykkää päätyjäykistettä.

Pistekuorma

- pistekuorman vaikutustapaus a , b tai c
- pistekuorman jakaantumispituus s_s .

4 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Mathcad-laskentapohja, joka laskee ohutuomaiselle harjapalkille tulevat rasitukset ja kestävyyydet Eurokoodien mukaan. Rasitusta vertaamalla kestävyYTEEN saadaan käyttöaste, josta tiedetään, riittääkö kyseisen osan kestävyys vai ei. Opinnäytetyössä pyrittiin tekemään laskentapohja, jonka laskentaa voitaisiin seurata mahdollisimman hyvin.

Tämän opinnäytetyön tekeminen perustui Eurokoodeissa olevien kaavojen syöttämiseen Mathcadiin. Kaavat syötettiin laskentapohjan siten, että ne täyttivät niille asetetut ehdot. Kaavoista, joihin on sisällytetty ohjeiden mukaiset ehdot ja rajaukset, muodostui harjapalkin laskenta.

Työn aikana huomattiin, että laskentapohjasta tulee melko pitkä. Kuitenkaan ei haluttu piilottaa mitään laskelmia, vaikka se olisi ollut mahdollista. Eurokoodien ohjeet ovat yllättävän monimutkaisia ja niitä tulkittaessa täytyi olla täsmällinen. Kului lukusia tunteja rajauksien ja kaavojen sovittamiseen laskentapohjaan siten, että ne huomioivat kaikki mahdolliset tapaukset.

Laskentapohjan tekemisessä oli haasteita. Aluksi ennen kuin laskentapohjan tekemistä oli edes aloitettu, etsittiin lukuisista lähteistä poikkileikkaukseltaan muuttuvan palkin taipumalle kaavoja. Lopulta taipuman laskennalle löydettiin menetelmä, mutta taipuman maksimiarvon etsiminen kyseisellä menetelmällä oli liian pitkä toimenpide, joten päätimme rajata taipuman laskentaa. Taipuma laskettiin vain palkin keskellä yhdestä tasaisesta kuormasta.

Toinen suuri haaste liittyi Mathcadin käyttöön. Kestävyyksiä ja käyttöasteita laskettaessa huomattiin Mathcadin hankala ominaisuus. Mathcad ei osannut iteroida käyttöasteen maksimiarvoa ilman syötettyä alkuarvausta. Lisäksi jossain tapauksessa käyttöasteen kuvaaja muodostui erilaisista funktioista ja kuvaaja saattoi sisältää epäjatkuvuuskohtia, mikä aiheutti sen, että Mathcad ei löytänyt maksimiarvoa ja laskennassa tapahtui virhe. Vaikka Mathcad yleensä löysi ajallaan maksimikäyttöasteen, iteroinnissa meni huomattavan kauan. Tämän asian ratkaisemiseen kului paljon aikaa. Laskentapohjaa ei saatu toimimaan toivotulla nopeudella. Tietokone saattoi olla myös osa syy laskennan hitauteen, koska

koneeni ei ole erityisen tehokas. Täysin hitaus ei voinut johtua tietokoneesta, koska myös muut Mathcadin käyttäjät olivat havainneet samanlaista hitautta.

Laskentapohjaa voitaisiin kehittää tulevaisuudessa monimuotoisemmaksi vastaamaan kaikenlaisia kuormituksia. Lisäksi pohjaan voisi yhdistää hitsien ja aukkojen mitoituksen, mikäli pohja saadaan toimimaan jouhevasti. Tässä laskentapohjassa on hyvänä puolena se, että sillä voi laskea mitoittavia kuormia ja kestävyksiä samaan aikaan. Laskentapohjaa voisi tiivistää sijoittamalla useita kaavoja samaan yhtälöön. Tällä saataisiin pohjasta nopeampi ja tiiviimpi, mutta laskennan seuranta hankaloituisi.

LÄHTEET

1. HITSATUT PROFIILIT EN 1993 –käsikirja. 2010. Ruukki. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.
2. SFS-EN 1993-1-5. 2006. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
3. SFS-EN 1993-1-1. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
4. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus.2010. Eurocode 3-oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
5. SFS-EN 1993-1-1. 2007. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1. Kansallinen liite. Suomi: Ympäristöministeriö.
6. SFS-ENV 1993-1-1/A2G. 1999. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Liite G vääntökestävyyden laskenta. Suomi: Metalliteollisuuden Standardisointikeskus.
7. Koivu, Teuvo 1970. Rakennustekniikan käsikirja. Pääjakso 1. Yleiset perusteet. Helsinki: Tammi.
8. SFS-EN 1990. 2006. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomi: Suomen standardisoimisliitto SFS.
9. SFS-EN 1990. 2007. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Kansallinen liite. Suomi: Ympäristöministeriö. Saatavana: <http://www.eurocodes.fi/1990/1990/NA%20SFS-EN1990-YM.pdf>. Hakupäivä 10.11.2011.