



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

KERROSTALON ULKOSEINIEN RANKARA- KENTEISEN LISÄLÄMMÖNERISTYKSEN KANTAVUUSMITOITUS

Tuomas Harmaala

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2016
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka

HARMAALA TUOMAS

Kerrostalon ulkoseinien rankarakenteisen lisälämmöneristyksen kantavuusmitoitus

Opinnäytetyö 111 sivua, joista liitteitä 50 sivua
Toukokuu 2016

Työn tavoitteena oli tutkia ja selvittää kerrostalon teräsrankarakenteisen lisälämmöneristyksen Eurokoodin mukainen mitoitustapa ja luoda saatujen tulosten perusteella Excel-mitoituspohja Insinööritoimisto Honkanen & Huuonon Oy:lle.

Työn tekeminen alkoi esimerkkirakenteen mitoittamisella. Esimerkkirakenteen avulla saatiin selvitettyä tarvittavat laskutoimitukset ja -kaavat. Mitoituspohja täydentyi esimerkkilaskelman edetessä. Työskentelyn tuloksena syntyi valmis opinnäytetyö, sekä Excel-mitoituspohja tilaajan käyttöön.

Työn tavoitteissa onnistuttiin hyvin. Eurokoodeista kokoamalla rakenteen mitoittamisen saatiin kattavat ja käyttökelpoiset laskukaavat. Laskentaa on yksinkertaistettu mahdollisuuksien mukaan kuitenkin niin, että laskenta on varman puolella. Työssä käsitellään kuormitusten laskeminen, ohutlevyrankojen mitoittaminen, liitosten mitoitus, rakenteen ankkurointi, sekä rakenteen U-arvon laskenta. Lopputuloksena saatu mitoituspohja mitoittaa kaiken tarvittavan riittävien lähtötietojen perusteella.

Mitoituspohja on jo nyt käyttökelpoinen sovellus, mutta käyttö rajoittuu rankaprofiilien osalta vain ennalta määräytyille poikkileikkausmuodoille. Mitoituspohjaa on kuitenkin helppo muokata ja laajentaa, jolloin sillä olisi mahdollista mitoittaa toisenlaisiakin rankoja. Lisätutkimuksena mitoittamiseen liittyen voisi tehdä laboratoriokokeita, joilla haettaisiin tietoa rankarakenteen murtumisesta ja saataisiin tarkempaa kuvaa laskennan varmuudesta. Toinen tutkittava asia olisi rakenteen pitkäaikaiskestävyys, jota ei tässä opinnäytetyössä tutkittu.

Asiasanat: lisälämmöneristys, kantavuusmitoitus, ohutlevyranka, ankkurointi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil and Construction Engineering
Specialisation in Building Structures Design

TUOMAS HARMAALA
Designing extra insulation skeleton structures for apartment building

Bachelor's thesis 111 pages, appendices 50 pages
May 2016

The purpose of this thesis was to research ways to design extra insulation skeleton structures according to Eurocodes and to create excel-based designing program for Insinööritoimisto Honkanen & Huuonen PLC.

The first step of the study was to design example structure. With example structure all of the required calculations were found and the excel-based designing program could be created. Result of a work was a ready thesis and the designing program for customer.

Goals of this study were filled. Now there are instructions for designing skeleton structures, connections, structure anchoring and calculating U-value and the designing program was made. All of the calculations are in designing program so all what user has to do is to fill initial data and program does all the calculations automatically.

Designing program is very usable already although usage is limited to precisely bounded structure. However it is quite easy to expand the program. If there is enthusiasm to survey the structure more, it would be explanatory to drive load tests in laboratory. Load tests would give information about structure breakage and design's safety factor. Also long-term longevity could be surveyed.

Key words: extra insulation, carrying capacity designing, skeleton structure, anchoring

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	9
2	RAJAUKSET	10
3	RAKENNUSTEN LISÄLÄMMÖNERISTÄMINEN	11
3.1	Rakenteen kosteustekninen toimivuus.....	11
3.2	Rakenteen lämpötekkninen toimivuus.....	12
4	RAKENNE.....	13
4.1	Rankarakenne.....	15
4.1.1	Verhouslevy	16
4.1.2	Hattuorsi.....	16
4.1.3	Vaakaorsi.....	17
4.1.4	Kulmarauta.....	17
5	KUORMAT JA KUORMITUKSET.....	19
5.1	Rakenteiden pysyvät kuormat.....	19
5.2	Tuulikuorma.....	19
5.3	Kuormitusyhdistelmät.....	21
6	RAJATILAT	23
6.1	Murtorajatilat	23
6.2	Käyttörajatilat	23
7	MITOITUS	24
7.1	Hattuorsi.....	24
7.1.1	Tuulenpaineen aiheuttama rasitus	24
7.1.1.1.	Taivutuskestävyys	25
7.1.1.2.	Taipuma (KRT).....	31
7.1.2	Tuulenimun aiheuttama rasitus	32
7.1.2.1.	Taivutuskestävyys	32
7.1.2.2.	Laippoihin kohdistuva vääntö.....	32
7.1.2.3.	Leikkauskestävyys	37
7.1.3	Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus	39
7.2	Vaakaorsi	39
7.2.1	Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus	40
7.2.2	Tuulikuorman aiheuttama rasitus	42
7.3	Kulmarauta.....	42
7.3.1	Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus	42
7.3.2	Tuulenimun aiheuttama rasitus	44
7.4	Liitosten mitoitus	46
7.4.1	Verhouslevyn kiinnitys hatuorteen	47

7.4.2	Hattutorren kiinnitys vaakaorren	48
7.4.3	Vaakaorren kiinnitys kulmarautoihin.....	49
7.5	Rakenteen ankkurointi betoniin	51
7.6	Rakenteen U-arvo	54
8	MITOITUSOHJELMAN TEKEMINEN	56
8.1	Käyttöliittymä	56
8.2	Ohjelman ulkonäkö.....	57
8.3	Ongelmat.....	57
9	POHDINTA.....	59
	LÄHTEET	60
	Liite 1. Mitoitusesimerkki	
	Liite 2. Esimerkkituloste Excel-pohjasta	

LYHENTEET JA TERMIT

A	profiilin poikkipinta-ala
A_c	levyn bruttopinta-ala
A_i	komponentin tehollinen pinta-ala
b	leveys
\bar{b}	tarkoituksenmukainen leveys
$c_{p,net}$	osapinnan nettotuulenpainekerroin
d	ruuvien halkaisija
E	kimmokerroin
e	epäkeskisyys
e_i	komponentin painopisteen etäisyys tehollisen poikkipinta- alan painopisteestä
e_{max}	profiilin reunan suurin etäisyys tehollisen poikkileikkauksen painopisteestä
f	taipuma
f_{bv}	leikkauslommahduslujuus
F_{Ed}	kuormittava voima murtorajatilassa
F_{Rd}	mitoituskestävyys
$F_{t,Ed}$	kuormittava vetovoima murtorajatilassa
$F_{t,Rd}$	mitoituskestävyys vetoa vastaan
$F_{v,Ed}$	kuormittava leikkausvoima murtorajatilassa
$F_{v,Rd}$	mitoituskestävyys leikkausta vastaan
f_y	teräksen myötölujuus
f_{yb}	teräksen myötölujuus
g_1	verhouslevyn paino
g_2	hattuorren paino
g_3	vaakaorren paino
g_4	lisälämmöneristeen paino
$G_{k,j}$	pysyvät kuormat omasta painosta
h	paksuus
h_w	uuman korkeus, joka on laippojen keskilinjojen välinen etäi- syys
I	jäyhyysmomentti

I_{eff}	tehollinen jäyhyysmomentti
$k_{d,n}$	kerroin
k_{σ}	lommahduskerroin
K_{FI}	seuraamusluokkakerroin
L	jänneväli
$M_{c,Rd}$	taivutuskestävyys
M_{Ed}	taivutusmomentti
M_{Rd}	taivutuskestävyys
m_x	kokeiden keskiarvotulos
n	kokeiden lukumäärä
N_{Ed}	vetovoima murtorajatilassa
P	esijännitysvoimat
p_{Ed}	viivakuorma murtorajatilassa
p_k	viivakuorma käyttörajatilassa
$q_k(h)$	rakennuksen korkeutta h vastaava nopeuspaine
$Q_{k,1}$	määrävä muuttuva kuorma
$Q_{k,i}$	muut muuttuvat kuormat
$q_{w,d}$	tuulikuorma murtorajatilassa
$q_{w,k}$	tuulikuorma käyttörajatilassa
R_n	ainekerroksen lämmönvastus
R_{se}	ulkopuolinen pintavastus
R_{si}	sisäpuolinen pintavastus
s	keskihajonta
s_1	hattuorsien k-k jako
s_2	vaakaorsien k-k jako
s_3	kulmarautojen k-k jako vaakasuunnassa
s_w	nurkkien keskipisteiden välinen uuman korkeus
t	paksuus
W_{eff}	tehollinen taivutusvastus
V_x	kokeiden variaatiokerroin
x	ruuvien määrä /risteyskohta <u>tai</u> kokeiden keskiarvotulos
x_i	yksittäinen koetulos
y_i	komponentin painopisteen etäisyys nollapisteestä
γ_P	osavarmuuskerroin esijännitysvoimille

η_d	kokonaisvarmuuskerroin betonille
λ	ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo
ρ	lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä
ϕ	uuman kaltevuus suhteessa laippoihin
ψ	jännityssuhde
$\psi_{0,i}$	yhdistelykerroin muuttuville kuormille

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ulkoseinän teräsrankarakenteisen lisälämmöneristysrakenteen Eurokoodin mukaista mitoittamista ja luoda tilaajan käyttöön Excel-pohjainen laskenta-alusta rakenteen mitoittamista varten. Mitoitusohjelmaa tehtäessä tavoitteena oli saada kaikki laskukaavat ohjelmaan siten, että eri osien ominaisuuksia voidaan muuttaa. Vaihtoehtoinen ajatus oli, että luodaan eräänlainen ”kirjasto”, jossa ennalta määrätyt rakenteet olisi valmiiksi mitoitettu. Kirjastomallin tapauksessa kirjastoa voitaisiin laajentaa tulevaisuudessa tarpeen mukaan.

Lisäksi ohjelmaan tuli saada osio, joka laskee vaadittavien betoniankkureiden määrän. Ulkoseinän lisälämmöneristäminen lisää ulkokuoren kuormaa oman painon muodossa, joten betonisandwich-rakenteessa ulkokuori tulee ankkuroida elementin sisäkuoreen. Kolmas osio laskenta-alustaan oli U-arvon laskenta. Tarkastelu on kuitenkin hyvin yksinkertainen, koska painopiste oli rankarakenteen mitoittamisessa. Siksi kylmäsiltojen vaikutus U-arvoon jätettiin huomioimatta.

Työssä on tarkoitus ensin käsitellä rakenteita yleisesti, sekä pohtia metallirakenteiden Eurokoodin mukaista mitoittamista. Tärkeää olisi keksiä miten laskukaavoja voidaan hyödyntää ja erityisesti yksinkertaistaa siten, että rakenteen mitoitus onnistuu käsinlaskentamenetelmin. Kaiken laskennan tulee olla turvallista ja varman puolella.

Tällä hetkellä valmiita rankajärjestelmiä on markkinoilla erittäin vähän ja niiden hinnat ovat korkeita. Metallipajalta tilatut yksinkertaiset rangat tulevat usein halvemmaksi kuin valmiit tuotteistetut järjestelmät, joten niiden suunnittelu voi olla kannattavaa.

Työn tilaajana toimi Insinööritoimisto Honkanen & Huuonen Oy, joka on Lahdessa toimiva rakentamisen konsulttitoimisto. Yrityksen palveluja ovat rakennesuunnitelmat niin korjaus- kuin uudisrakentamisessa, rakentamisen konsultointi, sekä rakennusvalvonta. Yritys on erikoistunut elementtirakenteisten väestönsuojien suunnitteluun.

2 RAJAUKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vain tietyn tyyppistä rankaratkaisua, joka on esitelty luvussa 4. Mitoituksen osalta verhoulevyn mitoitukseen ei oteta kantaa, koska käytännössä arkkitehtisuunnittelijalla on lukematon määrä vaihtoehtoja verhoustratkaisuksi eikä verhouksen mitoittamisessa yleisellä tasolla voida ottaa huomioon kaikkia mahdollisia muuttujia. Toisaalta verhoulevyjen valmistajilla on tavallisesti ohjeet levyjen kiinnitystä ja tukemista varten, jolloin varsinaista mitoitusta ei tarvitse tehdä. Myös rakenteen tarkempi kosteustekninen toiminta ja kylmäsiltojen vaikutus rakenteen lämmöneristävyyteen jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

3 RAKENNUSTEN LISÄLÄMMÖNERISTÄMINEN

Suomessa rakennettiin 1960 – 1970-luvuilla lähes 550 000 kerrostaloasuntoa. Tuon ajan rakennuskanta on korjausvaiheessa. Erityisesti linjasaneerausten ja julkisivukorjausten tarve on suuri. Lämmitysenergian kulutus on merkittävä osa Suomen rakennuskannan energiankulutuksesta, joten julkisivukorjausten yhteydessä tehtävä lisälämmöneristäminen on perusteltua. Tarkasteltaessa rakennuksen energiatehokkuutta lämmitysenergian tarpeen kautta, voidaan todeta juuri 1960 – 1970-luvun talojen olevan melko tehottomia. (Kouhia, Nieminen & Pulakka 2010; 6, 8 ja 15.)

Rakennuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat noin 40 % koko Suomen hiilidioksidipäästöistä. Suomi on sitoutunut kansainvälisiin sopimuksiin, joissa vaaditaan hiilidioksidipäästöjen alentamista. Yksi tehokas keino tähän on vanhojen rakennusten lämmitystarpeen vähentäminen lisälämmöneristämällä. Korjausrakentaminen on noussut volyymiltaan uudisrakentamista merkittävämmäksi, joten korjausrakentamiseen kohdistettavien toimenpiteiden vaikutus on lyhyellä tähtämelläkin uudisrakentamiseen kohdistettavia toimenpiteitä tehokkaampaa. (Kouhia, Nieminen & Pulakka 2010, 6.)

Julkisivujen lisäeristäminen kasvattaa rakennetta ulospäin. Tuulettuvan rankarakenteisen ratkaisun tapauksessa rakenteen paksuneminen on tyypillisesti luokkaa 100... 150 mm lisälämmöneristykseen paksuudesta riippuen. Korjauksen yhteydessä on kannattavaa uusita samalla ikkunat, mikäli ne ovat alkuperäiset. Mikäli ikkunoita ei uusita, vaikuttaa uusi rakenne ikkunoiden syvyysasemaan ja rakennuksen ulkonäkö ja ilme voi muuttua merkittävästi. Ikkunan sijainnilla seinän syvyysuunnassa on myös lämpöteknistä merkitystä. Ikkunan tulisi olla asennettuna seinään keskeisesti tai lämmöneristykseen tasoon. Mikäli ikkuna on asemoituna siten, että lämmöneristystä on vain vähän ikkunan kohdalla, muodostaa liittymä merkittävän kylmäsilan. (Kouhia, Nieminen & Pulakka 2010, 21-22.)

3.1 Rakenteen kosteustekninen toimivuus

Levyverhotun julkisivun kosteusteknisen toimivuuden kannalta oleellisia asioita ovat rakenteen riittävä tuuletus, verhourakenteen sadevedentiiviys sekä vuoto- ja kondenssivesien hallinta. Yleisesti ottaen rakennuksen ulkopuolelle sijoitettu lisälämmöneristys toimii kosteusteknisesti hyvin. Erityisesti mineraalivilla läpäisee hyvin kosteutta, jolloin

rakenteen kuivuminen ei ole ongelma. Suunnittelijan on kuitenkin hyvä varmistua laskelmin rakenteen kosteusteknisestä toimivuudesta. (Haukijärvi 2005, 8-9.)

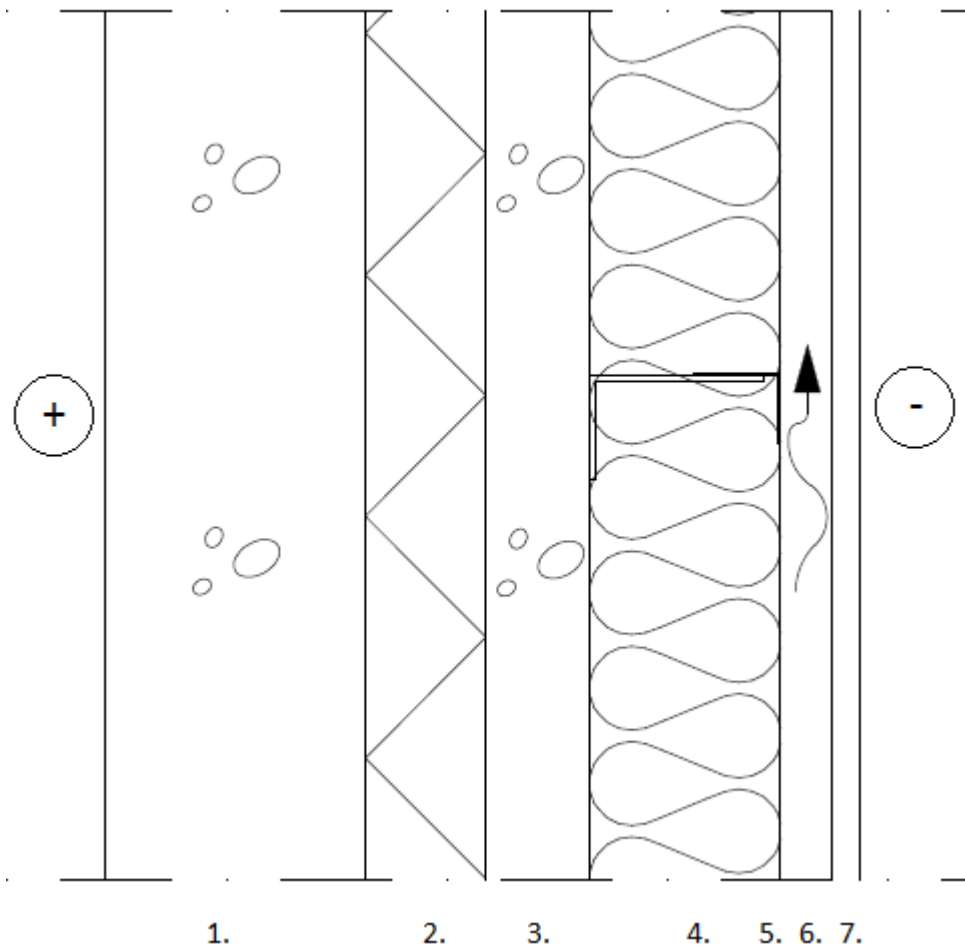
3.2 Rakenteen lämpötekniinen toimivuus

Verhouskorjauksen yhteydessä suositellaan liitettäväksi vähintään 50 mm:n paksuista lisälämmöneristystä. Lisälämmöneristämisen ansiosta vanhan seinän vaurioituminen käytännössä pysähtyy alenneen kosteusrasituksen ja kohonneen lämpötilan ansiosta. Lämpötekniisen toimivuuden varmistamiseksi on varmistuttava lämmöneristyksen yhtenäisyydestä ja siitä, että se on tiiviisti kiinni alustassaan. Mikäli alusta on epätasainen, voidaan se tasoittaa käyttämällä kahta eristekerrosta, joista sisempi on pehmeää villaa. Käytettäessä useampaa lämmöneristyskerrosta, on kerrosten saumat limitettävä. (Haukijärvi 2005, 9-10.)

4 RAKENNE

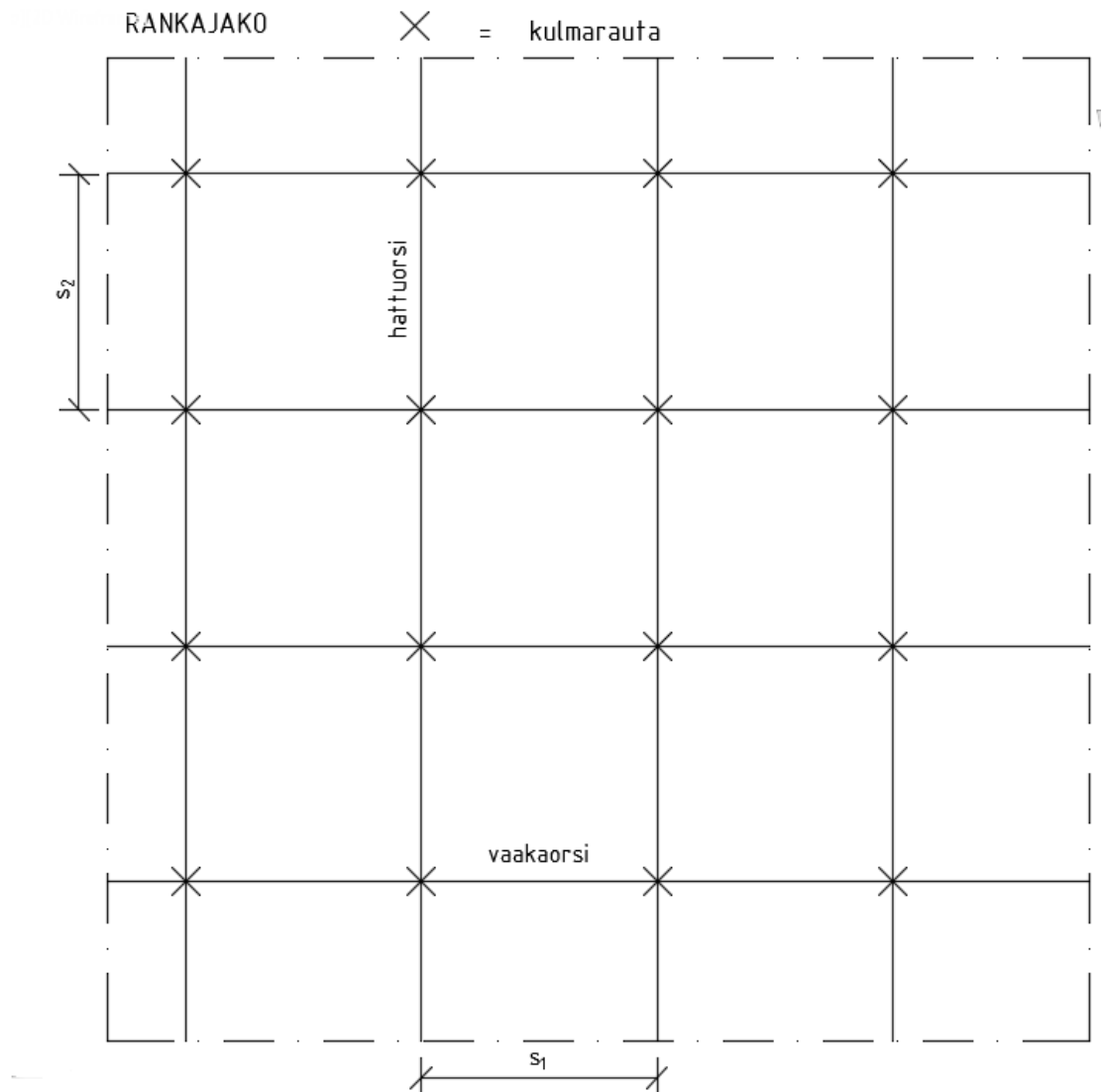
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kerrostalon (yleensä betonisandwichrakenteisen) ulkoseinän rankarakenteista lisälämmöneristystä. Ulkoseinän ollessa betonisandwichrakenteinen, on uusi ulkoseinärakenne:

1. Betoni sisäkuori (vanha rakenne)
2. Lämmöneriste (vanha rakenne)
3. Betoni ulkokuori (vanha rakenne)
4. Kulmaraudat + lisälämmöneristys
5. L-mallinen vaakaorsi
6. Hattuorsi pystyyn (tuuletusrako)
7. Verhouslevy

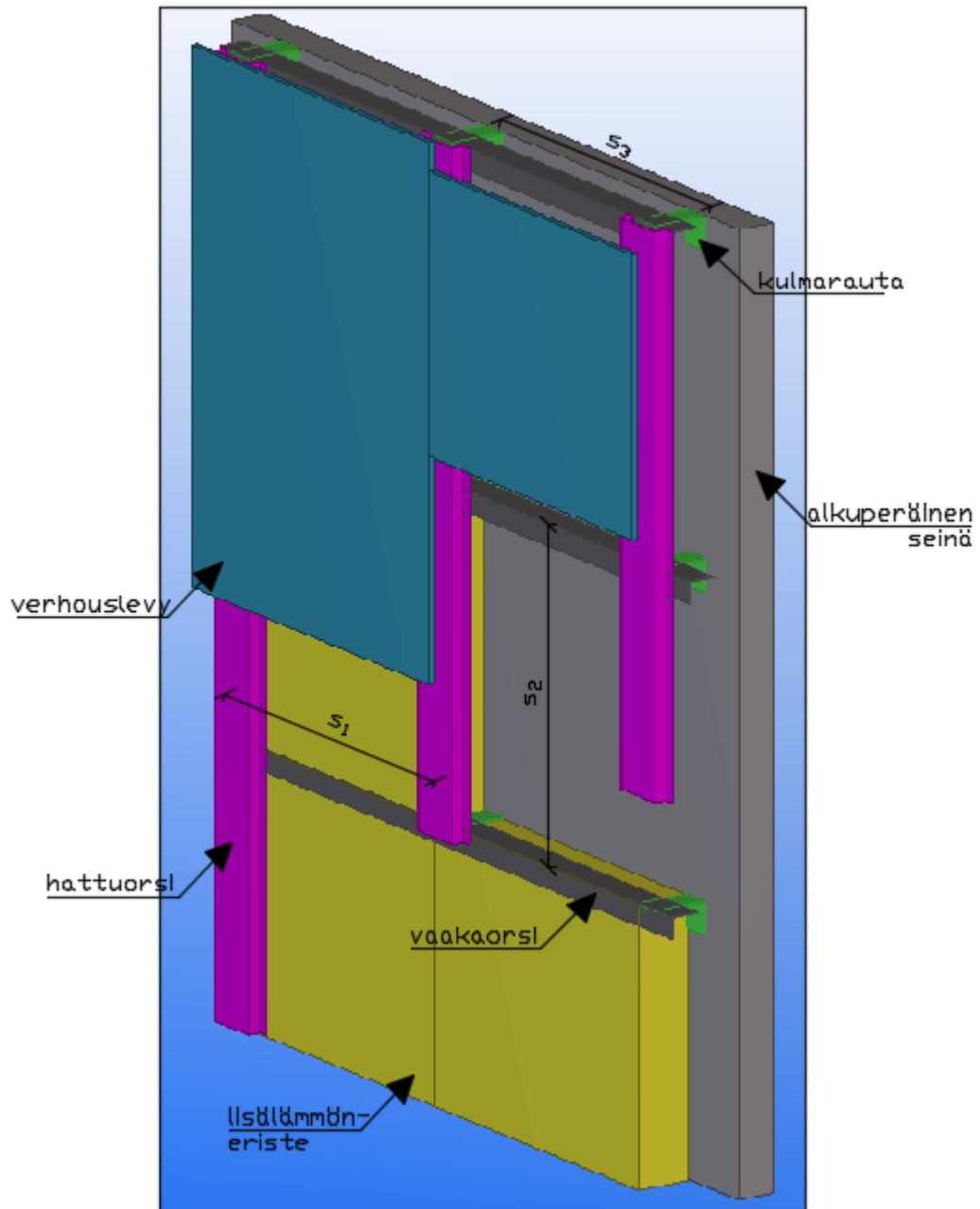


KUVA 1. RAKENNE

Suunnittelija määrittää kulmarautoille, vaakaorsille sekä pystyorsille tietyn rankajaon. Kulmarautojen pystysuuntainen jako on sama kuin vaakaorsilla. Vaakasuuntainen jako kannattaa olla sama kuin pystyrangoilla, jolloin vaakaorkeen ei kohdistu tuulen aiheuttamaa taivutusrasitusta tukipisteiden ollessa samalla linjalla kuormitusten kanssa.



KUVA 2. PERIAATEPIIRUSTUS RANKAJAOSTA



KUVA 3. HAVAINNEKUVA SEINÄÄN KIINNITETYSTÄ RANKARAKENTEESTA

4.1 Rankarakenne

Vaaka- ja pystyorret ovat ns. kevytorsia, jotka nimensä mukaan ovat keveitä teräksisiä ohutlevyrakenteita. Poikkileikkauksen muoto ja ainevahvuudet on valittu siten, ettei turhaa painoa pääse syntymään. Kevytorsien etu on pituuden vapaa valinta. Tuotetta tilataan määrämittaisena, jolloin hukkapaloja ei synny eikä ylimääräisiä jatkoksia tarvitse tehdä. Valmistus-, kuljetus ja asennusteknisistä syistä johtuen pituus rajoittuu kuitenkin käytännössä 14 metriin. Perusraaka-aineena käytetään tavallisesti kylmävalssattua,

kuumasinkittyä teräsohutlevyä S350GD+Z. Profiilien seinämän paksuus on tavallisesti 1... 3,5 mm. Myös kulmaraudat valmistetaan ohutlevystä. (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen & Väänänen 2001, 62 ja 65.)

Kevytorsia voidaan käyttää yksi- tai kaksiaukkoisina rakenteina, sleevejatkettuina tai limitettyinä rakenteina (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen & Väänänen 2001, 65). Tässä opinnäytetyössä rankarakenne mitoitetaan yksiaukkoisena, jolloin laskenta pysyy yksinkertaisena.

Ohutlevyjen valmistus tapahtuu kylmävalssauksen avulla ja lähtömateriaalina on rullalla oleva sopivan levyinen ja paksuinen kuumavalssattu nauha. Ennen valssauksen aloittamista nauhan pinnalta poistetaan epäpuhtaudet ja valssaushilse poistetaan peittaamalla laimennetussa hapossa. Kylmävalssaus tehdään jonovalssaimessa, jossa on peräkkäin useita valsseja. Kylmämuovauksessa tapahtuu mm. teräksen lujittumista, joten muokattavuuden säilyttämiseksi on tarvittaessa suoritettava hehkutuskäsittely ja usein lopuksi vielä viimeistelyvalssaus. (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen & Väänänen 2001, 19.)

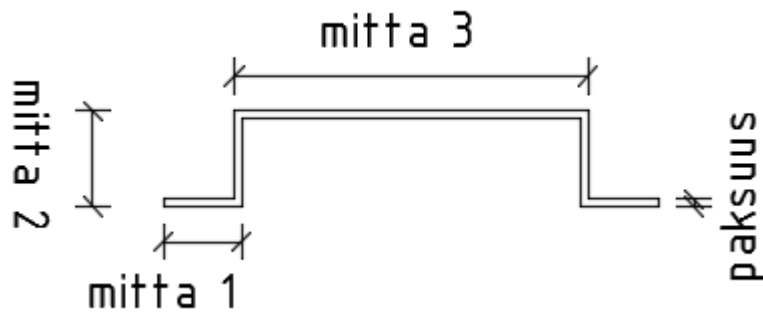
Jälkikäsitteilynä ohutlevy voidaan pinnoittaa (tavallisesti sinkitys). Sinkitys voidaan tehdä joko ns. kuumasinkityksenä tai sähkösinkityksenä. Kuumasinkityksessä nauhaa vedetään sulaa sinkkiä sisältävän altaan läpi. Sulaan sinkkipintaan voidaan haluttaessa puhaltaa kiteytymisytimiä, jolloin pintaan saadaan kiteytymiskuvio. Sähkösinkityksessä käsiteltävä kappale sinkitään sähköä avulla elektrolyysialtaassa. Sinkitys lisää teräksen korroosiokestävyyttä, joka on suoraan verrannollinen pinnoitteen paksuuteen. (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen & Väänänen 2001, 19.)

4.1.1 Verhouslevy

Verhouslevynä käytetään arkkitehtisuunnittelijan määräämää verhousta. Verhouksena voi olla esimerkiksi rapattava julkisivulevy, metallikasetti tai kivimurskepintainen levy.

4.1.2 Hattuorsi

Tässä työssä hattuorren muoto on rajattu symmetriseen profiiliin, jonka kaikki taitokset ovat 90 astetta. Suunnittelija määrittää orrelle poikkileikkauksen mitat ja paksuuden.

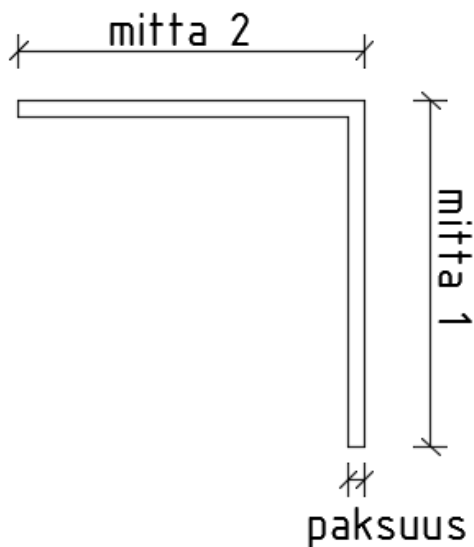


KUVA 4. HATTUORSI

Hattuprofiili toimii hyvin uloimpana ortena, koska siihen on yksinkertaista kiinnittää levyt. Hattuprofiililla saadaan samalla toteutettua verhoulevyn ja eristyksen väliin jäävä riittävä tuuletusrako.

4.1.3 Vaakaorsi

Vaakaortena käytetään L-mallista kevytortta. Suunnittelija määrittelee orrelle leveyden, korkeuden ja paksuuden.

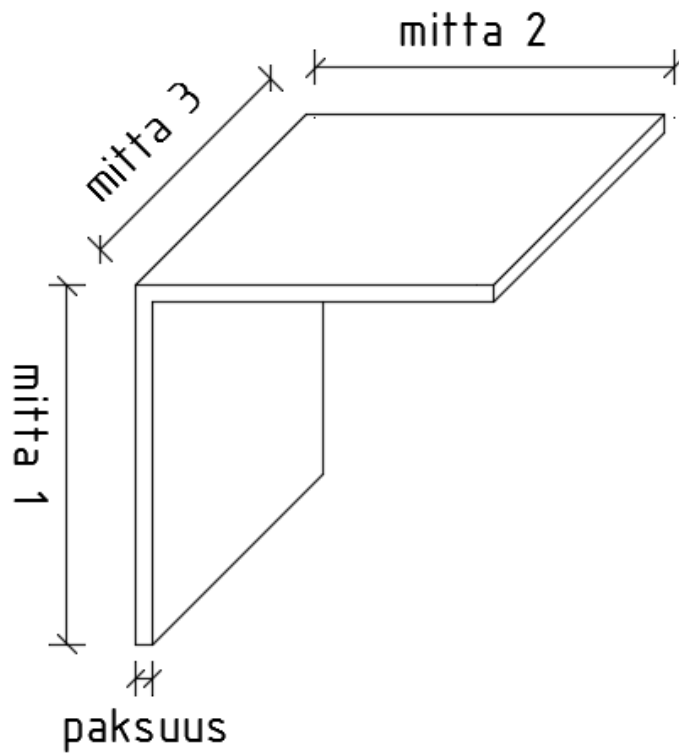


KUVA 5. VAAKAORSI

L-mallisen profiilin etu on se, että lämmöneristyksestä saadaan helposti yhtenäinen. Profiilit kiinnitetään kulmateräksillä (3.1.4, kulmarauta) rakennuksen runkoon.

4.1.4 Kulmarauta

Kulmarauta on L-mallinen kappale, jolle suunnittelija määrittää kuvan 6 mukaiset mitat.



KUVA 6. KULMARAUTA

5 KUORMAT JA KUORMITUKSET

Tämän tyyppisessä rakenteessa rakenteeseen kohdistuvat kuormat ovat rakenteiden oma paino sekä tuulikuorma. Omat painot luokitellaan pysyviksi kuormiksi (G) ja tuulikuormat muuttuviksi kuormiksi (Q) (RIL 201-1-2011, 29). Rakennuksen verhousrakenteeseen ei kohdistu hyötykuormaa. Onnettomuuskuormia (A) ei tutkita.

5.1 Rakenteiden pysyvät kuormat

Rakenteiden pysyvät kuormat koostuvat rakenteen omasta painosta johon kuuluvat kantavat ja ei-kantavat rakennusosat. Rakennuskohteen omina painona käytetään ominaisarvoja, jotka lasketaan nimellismittojen ja tilavuuspainojen ominaisarvojen perusteella (metallirankojen painot). Valmiiden kaupallisten tuotteiden ominaispainoina (verhouslevyt, eristeet) voidaan käyttää valmistajan ilmoittamia arvoja.

5.2 Tuulikuorma

Tuulikuorman määrittäminen Eurokoodin mukaan on hyvin työläs ja hankala kokonaisuus. Tämän opinnäytetyön pääpainopiste on rankarakenteen mitoittamisessa, joten käytetään tuulikuorman laskemisessa yksinkertaistettua menetelmää. Hyödynnetään laskennassa Puuinfo lyhennetyn suunnitteluohjeen tuulikuorman laskentatapaa, jota voidaan käyttää tavanomaisten rakennusten yhteydessä.

Rakennuksen tuulikuormaan vaikuttaa suuresti maaston rosoisuus ja pinnanmuodot (Puuinfo 2011, 12). Rakennukselle määritetään maastoluokka seuraavan taulukon mukaisesti:

TAULUKKO 1. MAASTOLUOKAT (Puuinfo Oy. 2011, Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 12)

Luokka	Maaston rosoisuuden ja pinnanmuodon kuvaus.
0	Avomeri tai merelle avoin rannikko.
I	Järvi tai alue, jolla on vähäistä kasvillisuutta eikä esteitä.
II	Alue, jolla on matalaa kasvillisuutta ja erillisiä puita tai rakennuksia, joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus. Esim. maatalousmaa.
III	Esikaupunki- tai teollisuusalueet sekä metsät. Matalat pientaloalueet ja kylät.
IV	Yhtenäiset laajat kaupunkialueet, joiden pinta-alasta vähintään 15% on rakennettu ja rakennusten keskimääräinen korkeus on yli 15 m.

Rakenteen osapinnoille kohdistuvaa paikallista tuulenpainetta käytetään rakenteiden kiinnitysten mitoituksessa sekä rakenneosien ja verhousten taivutustarkasteluissa. Rakenteen tuulikuorma määritetään ulkoisen ja sisäisen tuulenpaineen sisältävänä nettopaineena. Nettopaine lasketaan kaavasta (Puuinfo 2011, 13):

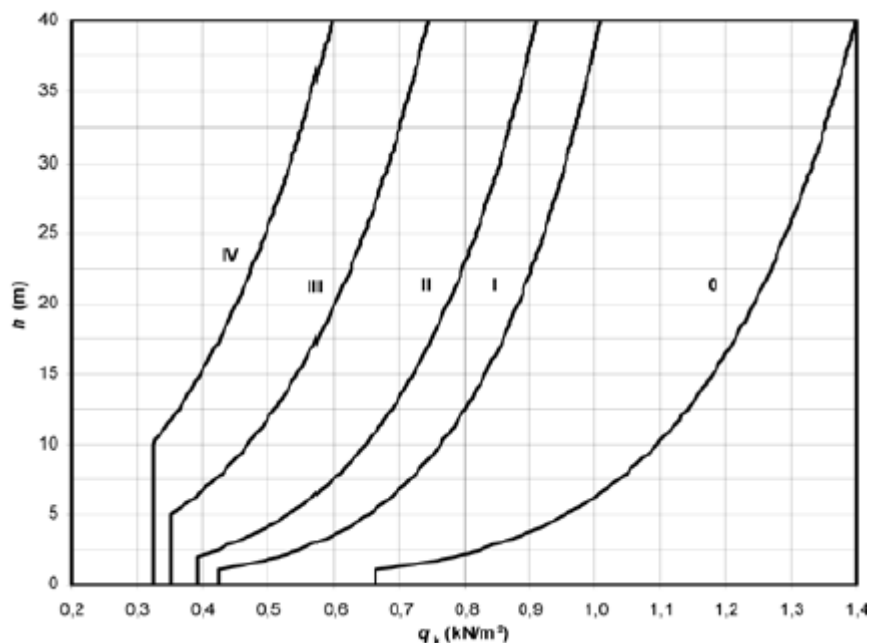
$$q_{w,k} = c_{p,net} q_k(h)$$

missä

$q_{w,k}$ on tuulenpaineen osapinnan aiheuttama nettopaine

$c_{p,net}$ on osapinnan nettotuulenpainekerroin (ks. taulukko 2)

$q_k(h)$ on rakennuksen korkeutta h vastaava nopeuspaine (ks. kuva 7).



KUVA 7. TUULEN NOPEUSPAINE (Puuinfo Oy. 2011, Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 13)

TAULUKKO 2. NETTOTUULENPAINEKERROIN (Puuinfo Oy. 2011, Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, 14)

Ulkoseinät	suurin imu nurkka-alueilla ¹⁾		suurin imu keskialueilla		suurin paine sisäänpäin	
	$A \geq 10$	$A \leq 1 \text{ m}^2$	$A \geq 10$	$A \leq 1 \text{ m}^2$	$A \geq 10$	$A \leq 1 \text{ m}^2$
tarkasteltava pinta-ala						
$C_{p,net}$	-1,5	-1,7	-1,1	-1,4	+1,1	+1,3

Taulukossa 2 esitetyt nettopainekertoimet on annettu tarkasteltavan osapinnan pinta-alan mukaan. Julkisivuverhosten kiinnitysten mitoituksessa käytetään alle 1 m^2 arvoja ja yli 10 m^2 arvoja käytetään esimerkiksi rankarakenteiden mitoitukseen. (Puuinfo 2011, 13.) Mikäli laskentaa halutaan yksinkertaistaa, voidaan kaikki tuulikuormat laskea alle 1 m^2 arvoilla, jolloin mitoitus on varman puolella. Nurkka-alue ulottuu rakennuksen ulkonurkasta molempiin suuntiin etäisyydelle $e/5$, jossa $e = \min(b; 2h)$, kun h on rakennuksen korkeus ja b on rakennuksen suurempi sivumitta. Muualle tuulen imulle voidaan käyttää keskialueen nettopainekerrointa.

5.3 Kuormitusyhdistelmät

Eurokoodin mukaan murtorajatilassa kuormituksia yhdistellään seuraavasti (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 80):

$$1,1K_{FI} \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right.$$

missä

K_{FI} on seuraamusluokkakerroin

$G_{k,j}$ on pysyvät kuormat (G_k). Epäedulliset kuormat kerrotaan kertoimella $1,1K_{FI}$ ja edulliset kuormat kertoimella $0,9$.

P on esijännitysvoimat

γ_P on osavarmuuskerroin esijännitysvoimille

$Q_{k,1}$ on määräävä muuttuva kuorma

$\psi_{0,i}$ on yhdistelykerroin muuttuville kuormille

$Q_{k,i}$ on muut muuttuvat kuormat

Opinnäytetyön tapauksessa kaikki kuormat ovat rakenteen kantavuuden kannalta epäedullisia. Koska ainut muuttuva kuorma on tuuli, ei kuormien yhdistelyssä käytettäviä yhdistelykertoimia ψ tarvitse käyttää. Tällöin kuormitusyhdistelmän laskeminen on hyvin yksinkertaista kuormitusyhdistelmän ollessa:

$$1,15K_{FI} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5K_{FI} Q_{k,1}$$

Kuitenkin vähintään

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

Suunnittelijan on tutkittava kumpi kuormitusyhdistelmä on rakenteen kannalta epäedullisempi.

Käyttörajatilassa kuormat lasketaan ominaisarvoilla.

6 RAJATILAT

Rakenteet suunnitellaan sekä murto- että käyttörajatilat huomioon ottaen. Murtorajatilamitoituksessa tutkitaan rakenteet kantokyvyn säilymistä ja ehjänä pysymistä kun taas käyttörajatilamitoituksessa määritellään ehdot käyttökelpoisuudelle normaalikäytössä. (RIL 201-1-2011, 27 ja 28.)

6.1 Murtorajatilat

Rakenteen murtorajatiloina tulee tässä yhteydessä tutkia ainakin seuraavat:

- aineen murtuminen rakenteen kestävyuden kannalta kriittisessä kohdassa
- rakenteen tai sen osan stabiiliuden menetys
- liian suuret siirtymät

6.2 Käyttörajatilat

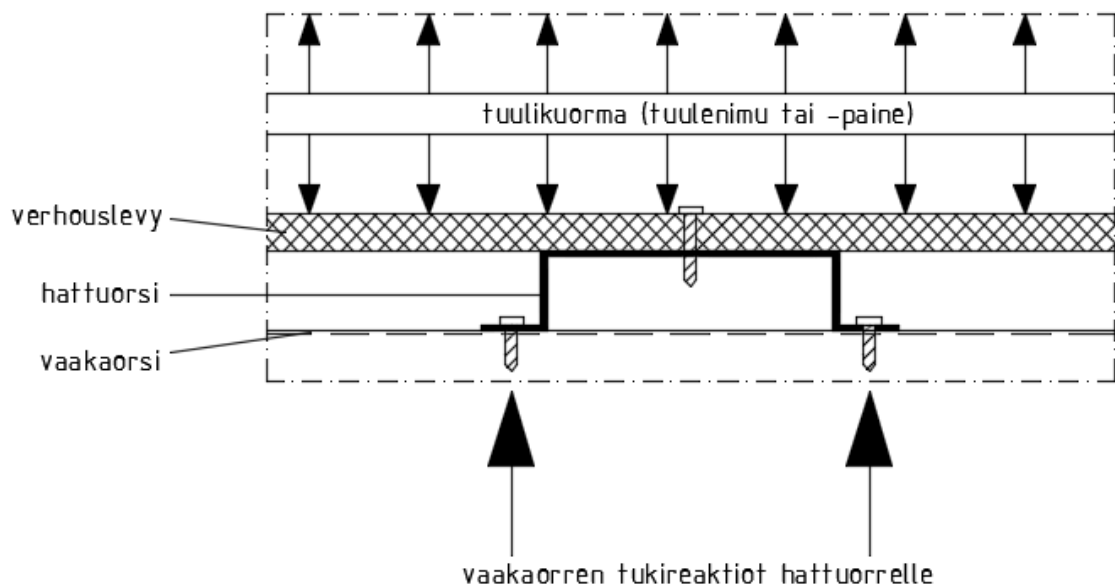
Tässä työssä käyttörajatilana tutkitaan siirtymärajatilaa (taipuma). Ainut taipumalle altis rakenne on hattuoersi.

7 MITOITUS

Mitoituksessa tarkastellaan kunkin rakenneosan mitoitus, liitosten mitoitus, sekä vanhan ulkokuoren ankkurointi sisäkuoreen lisääntyneen kuorman kannattamiseksi. Myös ulkoseinärakenteen U-arvo mitoitetaan.

7.1 Hattuorsi

Hattuorreen kohdistuvat kuormat ovat tuulikuorma, sekä verhouslevyn paino. Tukireaktioita syntyy verhouslevyn ja vaakaorren kanssa.



KUVA 8. HATTUORSI JA SIIHEN KOHDISTUVAT VOIMAT

7.1.1 Tuulenpaineen aiheuttama rasitus

Tuulenpaine aiheuttaa hattuorrelle puristuskuormaa, mikä pyrkii taivuttamaan hattuorsia niiden tukipisteiden (vaakaorret) välillä.

Tuulenpaineen aiheuttama puristuskuorma on:

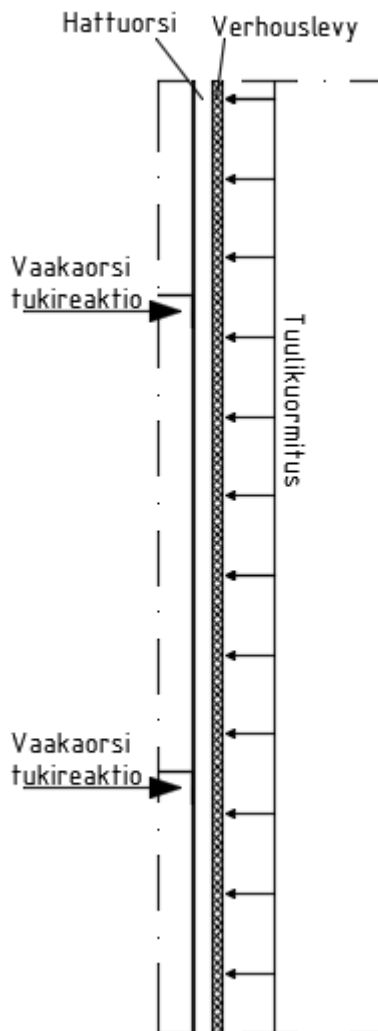
$$p_{Ed} = s_1 \cdot q_{w,d} \quad [\text{kN/m}]$$

missä

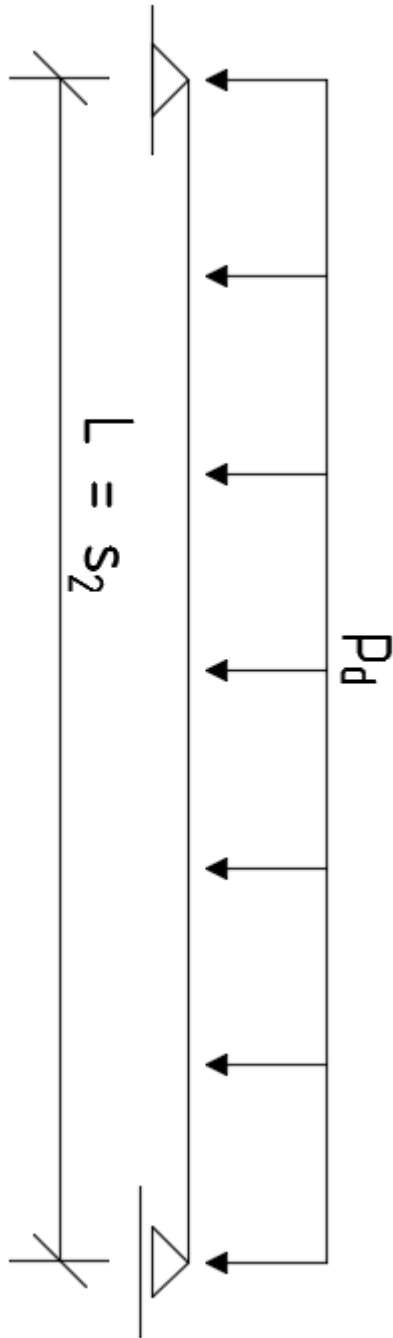
- P_{Ed} on puristuskuorma [kN/m]
 s_1 on hattuorsien k-k jako [m]
 $q_{w,d}$ on tuulikuorma murtorajatilassa [kN/m²].

7.1.1.1. Taivutuskestävyys

Mitoitetaan hattuorsi taivutukselle yksiaukkoisena rakenteena, jolloin laskenta on yksinkertaista ja varmallu puolella. Tuulenpaine aiheuttaa orrelle tasaista kuormitusta.



KUVA 9. HATTUORREN TUULIKUORMITUS JA TUKIREAKTIOT



KUVA 10. HATTUORREN RAKENNEMALLI

Maksimi taivutusmomentti ja taivutuskestävyys lasketaan seuraavasti (SFS-EN 1993-1-1):

$$M_{Ed, \max} = \frac{qL^2}{8}$$

$$p_d = q_{w,d} \cdot s_1$$

$$M_{Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

missä

$M_{Ed,max}$ on maksimi taivutusmomentti

q on viivakuorma

$q_{w,d}$ on tuulikuorma murtorajatilassa [kN/m²]

s_l on hattuorsien k-k jako

W_{eff} on tehollinen taivutusvastus

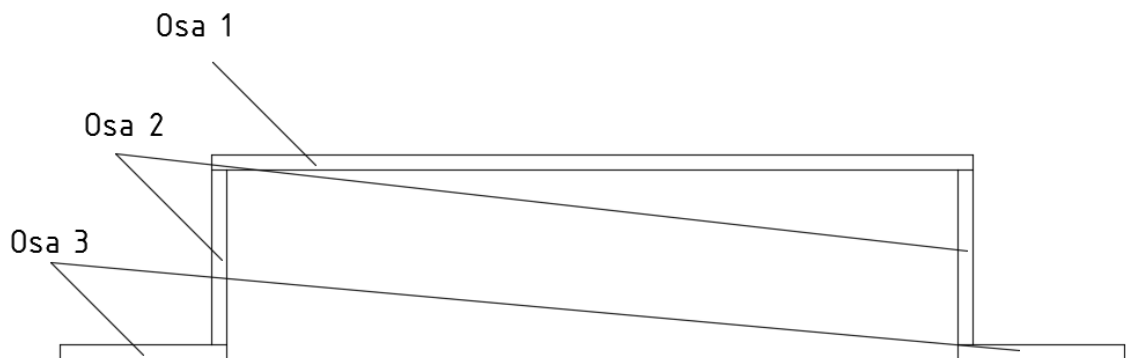
M_{Rd} on taivutuskestävyys

f_y on teräksen myötölujuus.

Mitoitusehto:
$$\frac{M_{Ed,max}}{M_{Rd}} \leq 1$$

Tehollinen poikkipinta-ala

Profiilin tehollinen poikkipinta-ala lasketaan SFS-EN 1993-1-5 luvun 4.4 mukaan. Ohjeen mukaan lasketaan tasaisen puristetun levyn tehollisia pinta-aloja. Tällöin profiili tulee jakaa osiin seuraavalla tavalla, jolloin osat ovat ”tasaisia levyjä”:



KUVA 11. PROFIILIN JAKAMINEN KOMPONENTTEIHIN

Osat 1 ja 2 ovat kahdelta reunalta tuettuja taso-osia, kun taas osat 3 ovat yhdeltä reunalta tuettuja osia. Taso-osan tehollinen pinta-ala lasketaan kaavasta:

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

missä

ρ on lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä

A_c on levyn bruttopinta-ala.

Pienennystekijä ρ lasketaan seuraavasti:

- Kahdelta reunalta tuetut taso osat:

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

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

- Yhdeltä reunalta tuetut taso-osat:

$$\rho = 1,0 \quad \text{kun } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{kun } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

missä

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

ψ on jännityssuhde (ks. taulukot 3 ja 4)

\bar{b} on tarkoituksenmukainen leveys (tässä tapauksessa aina taso-osan todellinen leveys)

k_σ on jännityssuhdetta ψ ja reunaehtoja vastaava lommahduskerroin (ks. taulukot 3 ja 4)

t on paksuus

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N/mm^2]}}$$

TAULUKKO 3. KAHDELTA REUNALTA TUETUT TASO-OSAT (SFS-EN 1993-1-5, 18)

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

TAULUKKO 4. YHDELTA REUNALTA TUETUT TASO-OSAT (SFS-EN 1993-1-5, 18)

Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)				Tehollinen ^p leveys b_{eff}		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$		
Lommukskerroin k_c	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	
Lommukskerroin k_c	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8	

Profiilin taivutustilanteessa vedetyllä puolella olevien laippojen tehollinen pinta-ala on sama kuin osien bruttopinta-ala.

Tuulenpaineen tapauksessa profiilin verhouslevyä vasten oleva laippa on puristetulla puolella (pienennystekijä laskettava) ja vaakaorsia vasten olevat laipat vedetyllä puolella (pienennystekijää ei lasketa).

Tehollinen taivutusvastus lasketaan tehollisen poikkipinta-alan perusteella Steinerin säännön avulla. Poikkileikkaus jaetaan vastaaviin osiin kuin tehollisen poikkipinta-alan laskennassa.

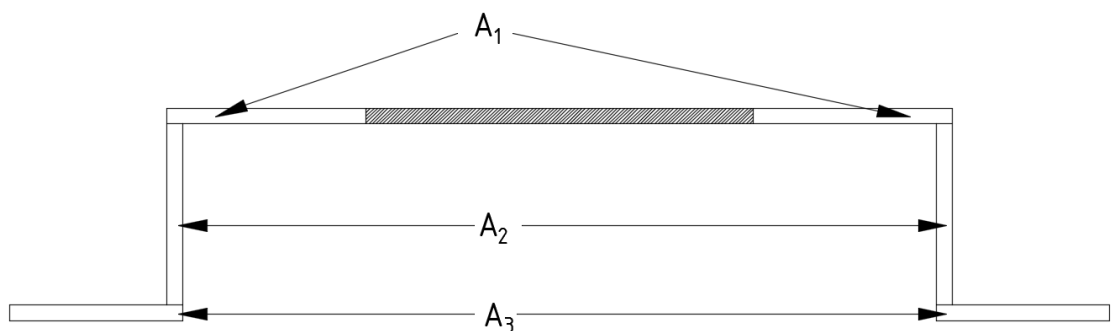
Tehollisen poikkipinta-alan painopiste on (Tekniikan kaavasto 2005, 93):

$$y = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3}{A_{kok}}$$

missä

A_i on osan tehollinen pinta-ala

y_i on osan painopisteen etäisyys nollapisteestä



KUVA 12. TEHOLLINEN POIKKILEIKKAUS OSIIN JAETTUNA

Tehollisen poikkipinta-alan aksiaalinen jäyhyysmomentti on (Tekniikan kaavasto 2005, 93):

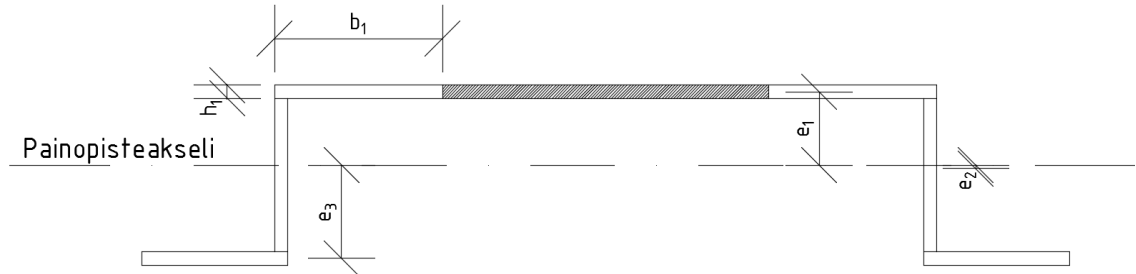
$$I_{eff} = I_1 + A_1 \cdot e_1^2 + I_2 + A_2 \cdot e_2^2 + I_3 + A_3 \cdot e_3^2$$

missä

I_i on komponentin tehollisten mittojen perusteella laskettu

jäyhyysmomentti ($I = \frac{b \cdot h^3}{12}$)

A_i on osan tehollinen pinta-ala
 e_i on osan painopisteen etäisyys tehollisen poikkipinta-alan painopisteestä



KUVA 13. OSIEN PAINOPISTEIDEN ETÄISYYDET POIKKILEIKKAUKSEN PAINOPISTEESTÄ

Poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus saadaan aksiaalisesta jäyhyysmomentista (Ruukki 2010, 121):

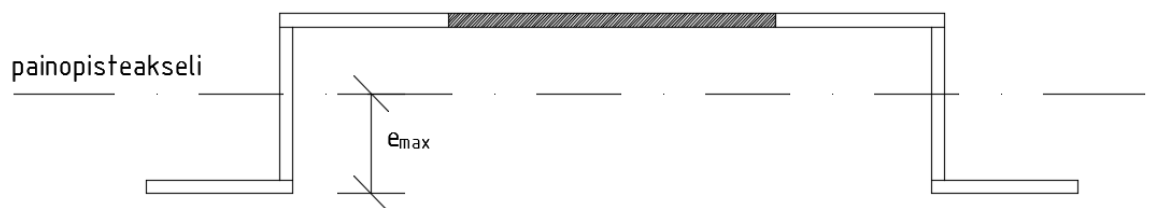
$$W_{eff} = I_{eff} / e_{max}$$

missä

W_{eff} on tehollinen taivutusvastus

I_{eff} on tehollinen jäyhyysmomentti

e_{max} on profiilin reunan suurin etäisyys tehollisen poikkileikkauksen painopisteestä kohtisuorasti tutkittavaa akselia vasten.



KUVA 14. PROFIILIN REUNAN SUURIN ETÄISYYS PAINOPISTEESTÄ

7.1.1.2. Taipuma (KRT)

Tuulenpaine pyrkii taivuttamaan hattuoortta, jolloin taipuma on:

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_k \cdot L^4}{E \cdot I_{eff}}$$

$$P_k = q_{w,k} \cdot s_1$$

missä

f	on taipuma
p_k	on viivakuorma käyttörajatilassa
L	on hattuorren jänneväli
E	teräksen kimmokerroin
I_{eff}	on hattuorren tehollinen jäyhyysmomentti
$q_{w,k}$	on tuulikuorma käyttörajatilassa
s_1	on hattuorsien k-k väli

Seinäorsien taipuman raja-arvo on $L/150$ (Ympäristöministeriö 2015, 15).

7.1.2 Tuulenimun aiheuttama rasitus

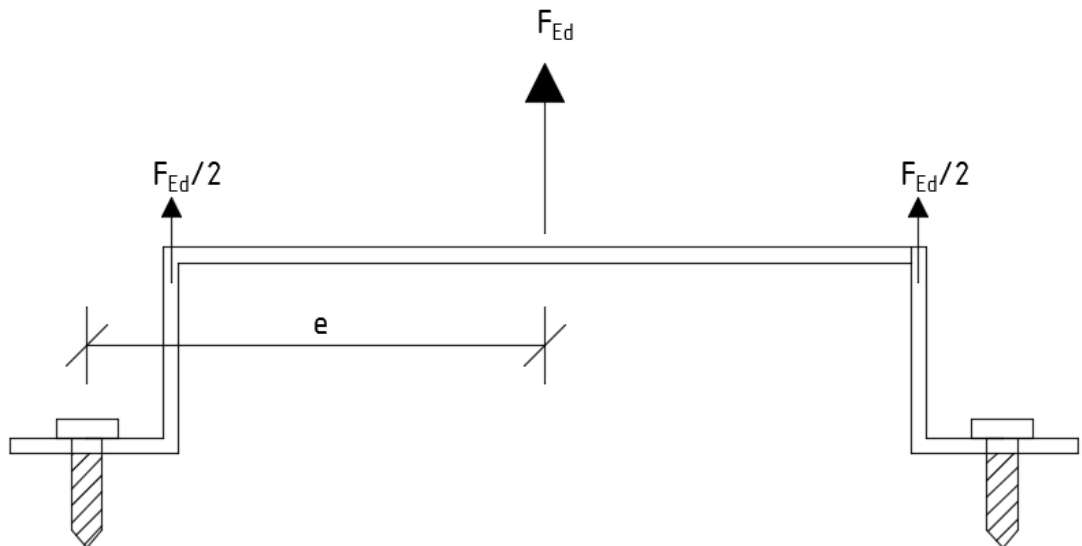
Tuulenimu aiheuttaa hattuorrelle monenlaisia rasituksia. Keskeisimmät tutkittavat rasitukset ovat hattuorren taivutus, laippojen taivutus, sekä hattuorreen kohdistuva leikkausvoima.

7.1.2.1. Taivutuskestävyys

Orsi mitoitetaan taivutusrasitusta vastaan kuten kohdassa 7.1.1.1. Profiilin tehollista poikkipinta-alaa laskettaessa tulee huomioida, että tässä tapauksessa verhoukslevyä vasten oleva laippa on vedetyllä puolella ja vaakaorsia vasten olevat laipat puristetulla puolella.

7.1.2.2. Laippoihin kohdistuva taivutus

Tuulenimu pyrkii taivuttamaan hattuorsien laippoja.



KUVA 15. HATTUORTEEN KOHDISTUVA TUULENIMU

Taivutusmomentti on suurin kiinnityksen juuressa. Laipan kestävyyttä ei kuitenkaan lasketa suoraan momentin kautta. Laipan kestävyyttä verrataan uumassa vaikuttavaan uuman suuntaiseen voimaan $F_{Ed} / 2$. (SFS-EN 1993-1-8, 72-84.)

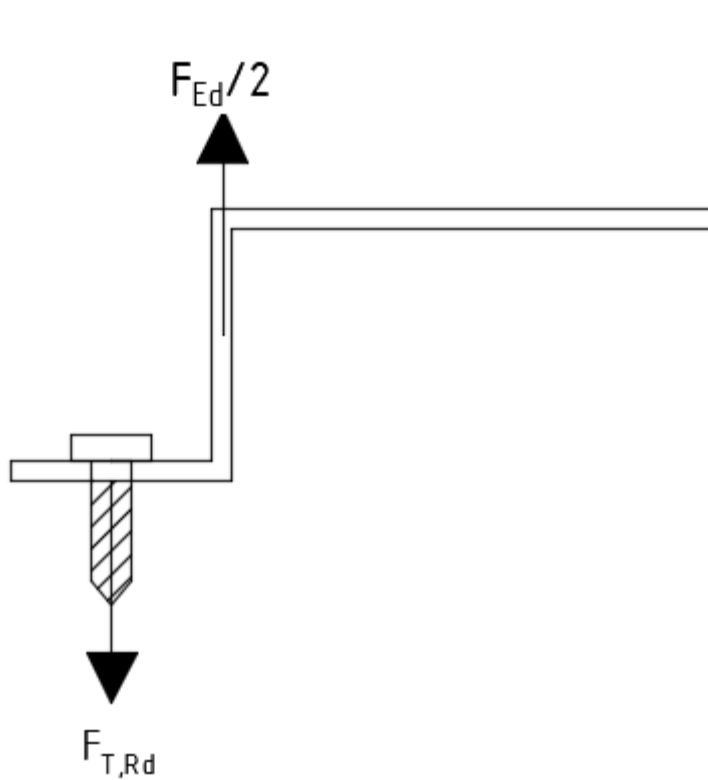
$$F_{Ed} / 2 = \frac{(q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2)}{2}$$

missä

$f_{w,d}$ on maksimi tuulenimu murtorajatilassa

s_1 on hattuorsien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako



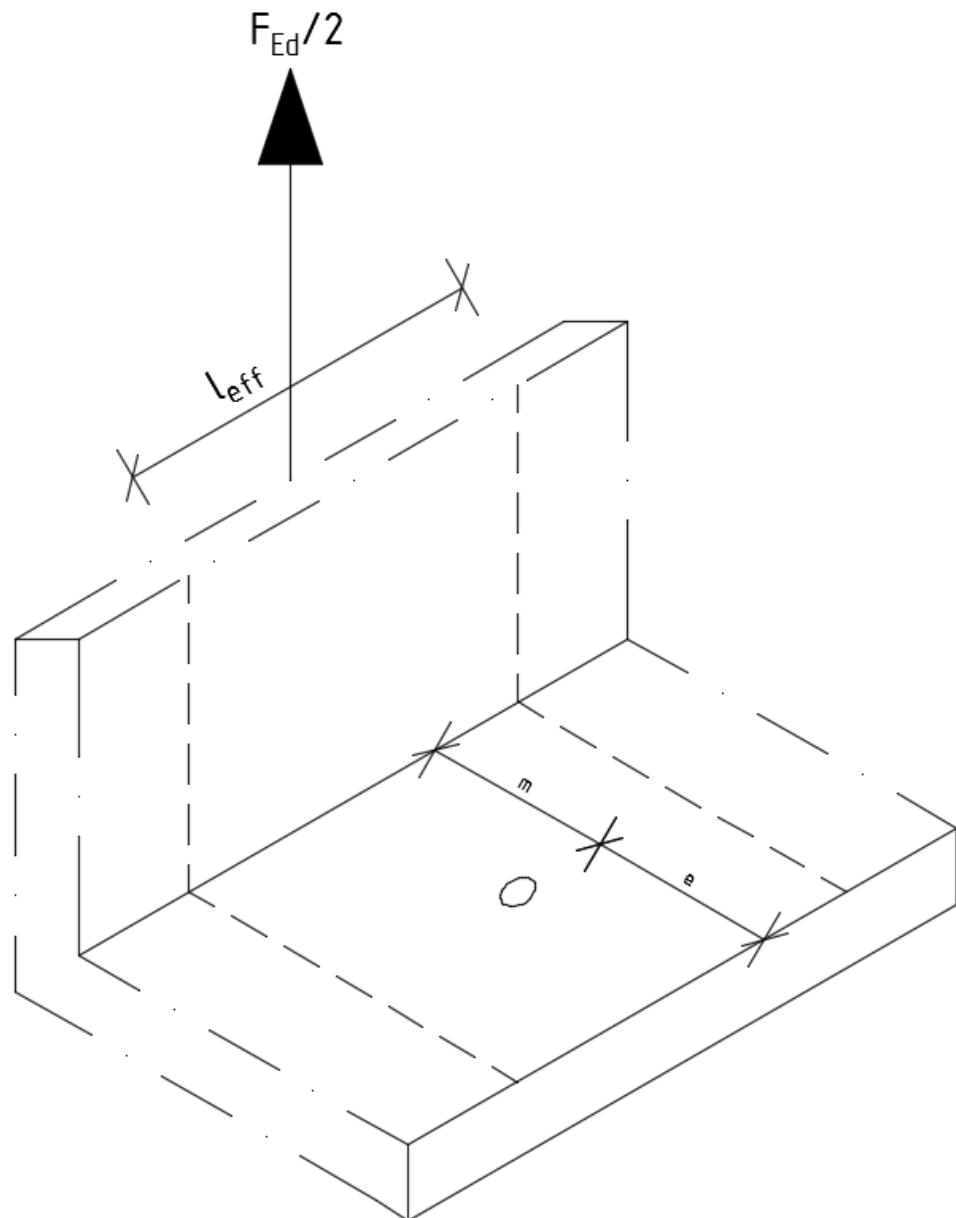
KUVA 16. UUMASSA VAIKUTTAVA VOIMA JA LAIPAN VASTAVOIMA

Hattuorren laipan taivutuskestävyys lasketaan Eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 luvun 6.2.4 ”Vedetty ekvivalentti T-osa” mukaan.

Vedettyä ekvivalenttia T-osaa voidaan käyttää seuraavien ruuviliitosten peruskomponenttien kestävyysmitoitussarvon mallinemaiseksi:

- pilarin laipan taivutus;
- päätylevyn taivutus;
- laipan kulmateräksen taivutus;
- pilarin pohjalevyn taivutus, kun pilarin pohjalevyyn kohdistuu vetovoima.

Tässä tapauksessa hattuorsi voidaan ajatella pilariksi. Kestävyysmitoitussarvon laskemiseksi tarvitaan kuvan 17 mukaiset mitat e , m ja l_{eff} .

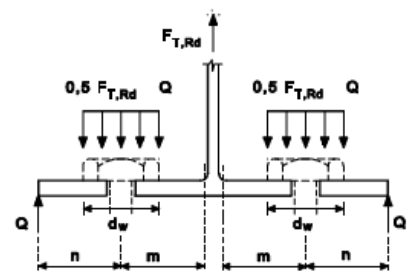


KUVA 17. EKVIVALENTIN T-OSAN LAIPAN MITAT

Kestävyysmitoitussarvon $F_{T,Rd}$ laskukaavat on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. LAIPAN T-OSAN KESTÄVYYDEN MITOITUSARVO $F_{T,Rd}$ (SFS-EN 1993-1-8, 74)

	Vipuvoimia voi syntyä, jos $L_b \leq L_b^*$		Vipuvoimia ei synny
Murtumismalli 1	Menetelmä 1	Menetelmä 2 (vaihtoehtoinen menetelmä)	
Taustalevyjä ei käytetä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Käytetään taustalevyjä	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	
Murtumismalli 2	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma F_{t,Rd}}{m+n}$		
Murtumismalli 3	$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd}$		
<p>Murtumismalli 1: Täyden mekanismin syntyminen laipassa Murtumismalli 2: Ruuvien murtuminen, kun laippa samalla myötää Murtumismalli 3: Ruuvien murtuminen</p> <p>L_b on -ruuvien venymäpituus, jonka arvoksi valitaan liitospaksuus (liitettävien materiaalien ja aluslaattojen yhteenlaskettu paksuus) lisättyinä arvolla, joka on puolet ruuvien kannan ja mutterin yhteenlasketusta paksuudesta tai; - perustusruuvien tapauksessa perustusruuvien venymäpituus, jonka arvoksi valitaan kahdeksan kertaa ruuvien nimellishalkaisija + jälkivalun paksuus + pohjalevyn paksuus + aluslaatan paksuus + puolet mutterin korkeudesta.</p> <p>$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s}{\Sigma \ell_{eff,1} t_f^3}$</p> <p>$F_{T,Rd}$ on laipan T-osan vetokestävyyden mitoitusarvo Q on vipuvoima</p> <p>$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $M_{pl,2,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $M_{bp,Rd} = 0,25 \Sigma \ell_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$</p> <p>$n = e_{min}$ mutta $n \leq 1,25m$</p> <p>$F_{t,Rd}$ on ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo, ks. taulukko 3.4; $\Sigma F_{t,Rd}$ on T-osan kaikkien ruuvien vetokestävyyksien mitoitusarvojen $F_{t,Rd}$ summa; $\Sigma \ell_{eff,1}$ on $\Sigma \ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 1; $\Sigma \ell_{eff,2}$ on $\Sigma \ell_{eff}$:n arvo murtumismallissa 2; e_{min}, m ja t_f ovat kuvan 6.2 mukaisia suureita; $f_{y,bp}$ on taustalevyjen myötöraja; t_{bp} on taustalevyjen paksuus; $e_w = d_w/4$; d_w on aluslaatan halkaisija, tai ruuvien kannan tai mutterin avainväli tarkasteltavasta tapauksesta riippuen.</p> <p>Huom. 1: Pilarien ja palkkien välisissä ruuviliitoksissa ja palkkien jatkoksissa voidaan olettaa, että syntyy vipuvoimia. Huom. 2: Menetelmässä 2 oletetaan, että ruuvien kautta T-osan laippaan vaikuttava voima jakaantuu tasaisesti (eikä pistemäisesti ruuvien keskilinjalla) aluslaatan, ruuvien kannan tai mutterin alla tapauksesta riippuen, ks. tämän taulukon kuva. Tämä oletus johtaa suurempiin kestävyysarvoihin murtumismallissa 1, mutta $F_{T,1-2,Rd}$:n arvot ja murtumismallien 2 ja 3 kestävyysarvot eivät muutu.</p>			



Laipan tehollinen leveys ℓ_{eff} lasketaan taulukon 6 mukaan.

TAULUKKO 6. JÄYKISTÄMÄTTÖMIEN PILARIEN LAIPPOJEN TEHOLLISET LEVEYDET (SFS-EN 1993-1-8, 84)

Ruuvirivin sijainti	Ruuviriviä tarkastellaan yksittäisenä ruuvirivinä		Ruuviriviä tarkastellaan ruuvirivien ryhmän osana	
	Pyöreä myötökuvio $l_{\text{eff,cp}}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{\text{eff,nc}}$	Pyöreä myötökuvio $l_{\text{eff,cp}}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{\text{eff,nc}}$
Sisempi ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Reunimmainen ruuvirivi	Pienempi arvoista: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Pienempi arvoista: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	Pienempi arvoista: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Pienempi arvoista: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Murtumis-malli 1:	$l_{\text{eff,1}} = l_{\text{eff,nc}}$ mutta $l_{\text{eff,1}} \leq l_{\text{eff,cp}}$		$\sum l_{\text{eff,1}} = \sum l_{\text{eff,nc}}$ mutta $\sum l_{\text{eff,1}} \leq \sum l_{\text{eff,cp}}$	
Murtumis-malli 2:	$l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}}$		$\sum l_{\text{eff,2}} = \sum l_{\text{eff,nc}}$	

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{F_{T,Ed}}{F_{T,Rd}} \leq 1$$

7.1.2.3. Leikkauskestävyys

Tuuli aiheuttaa hattutorrelle leikkausvoimaa. Hattutorren tukipisteet ovat vaakaorsien kohdalla. Tällöin mitoittava leikkausvoima on:

$$F_{v,Ed} = (q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2) / 2$$

missä

$q_{w,d}$ on tuulikuorma murtorajatilassa

s_1 on hattuorsien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo $V_{b,Rd}$ lasketaan kaavasta (SFS-EN 1993-1-3, 45):

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} \cdot t \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}}$$

missä

h_w	on uuman korkeus, joka on laippojen keskilinjojen välinen etäisyys
t	on hattuorren seinämän paksuus
f_{bv}	on taulukon 7 mukainen leikkauslommahduslujuus
ϕ	on uuman kaltevuus suhteessa laippoihin ($=90^\circ$)

TAULUKKO 7. LEIKKAUSLOMMAHDUSLUJUUS f_{bv} (SFS-EN 1993-1-3, 45)

Uuman muunnettu hoikkuus	Uuma, jossa tuen kohdalla ei ole jäykisteitä	Uuma, jossa tuen kohdalla on jäykisteet ¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

¹⁾ Jäykisteet tuella, kuten tukilevyt, jotka sijoitetaan estämään uuman vääristyminen ja suunnitellaan kestävä tukireaktio.

Uuman muunneltu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$ lasketaan seuraavasti (SFS-EN 1993-1-3, 45):

- uumat, joissa ei ole pituussuuntaisia jäykisteitä (tämän työn tapaus)

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}}$$

missä

s_w	on nurkkien keskipisteiden välinen uuman korkeus (mitta 2, ks. kuva 4)
t	on hattuorren seinämän paksuus
f_{yb}	on hattuorren myötölujuus
E	on teräksen kimmokerroin

Koska hattuorressa on kaksi uumaa, tulee leikkauskestävyyden mitoitusarvo kertoa kahdella.

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{F_{V,Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$$

7.1.3 Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus

Verhouslevy on ainut omalla painollaan hattuortta rasittava rakenneos. Verhouslevyn oma paino aiheuttaa orrelle vetorasitusta. Vetorasituksen suuruus on:

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot g_{k,verhouslevy} \cdot s_1 \cdot s_2$$

missä

g_1 on verhouslevyn oma paino

s_1 on hattuorsien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako

Hattuorren vetokestävyuden mitoitusarvo on (SFS-EN 1993-1-1, 52):

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

missä

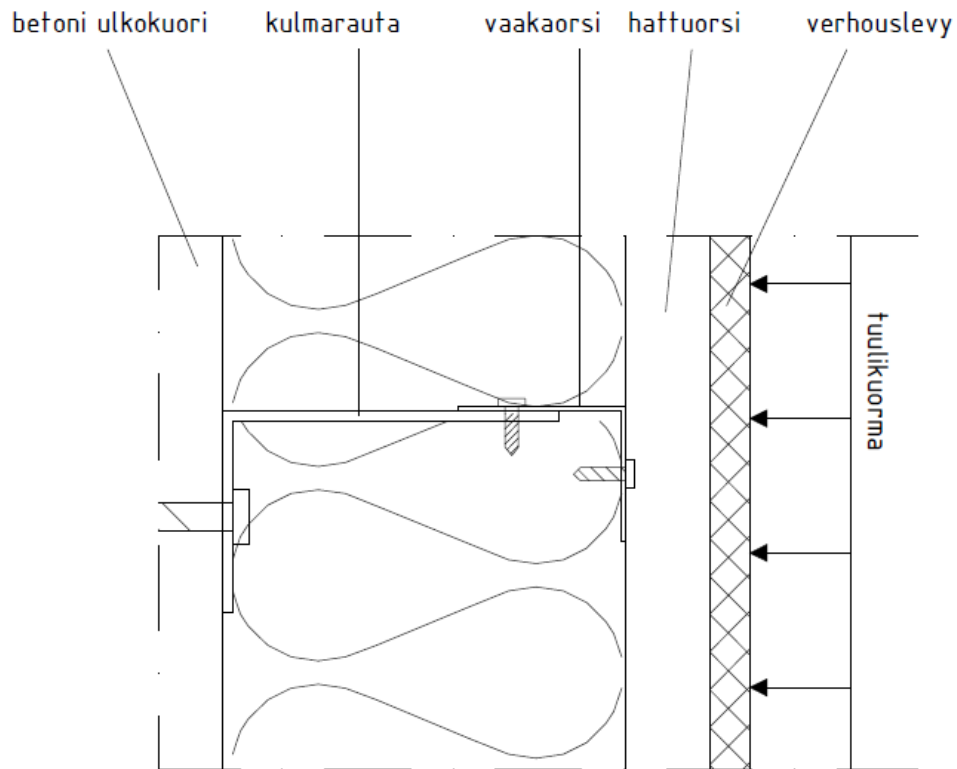
A on hattuorren poikkileikkauksen pinta-ala

f_y on hattuorren myötölujuus

Mitoitusehto: $\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$

7.2 Vaakaorsi

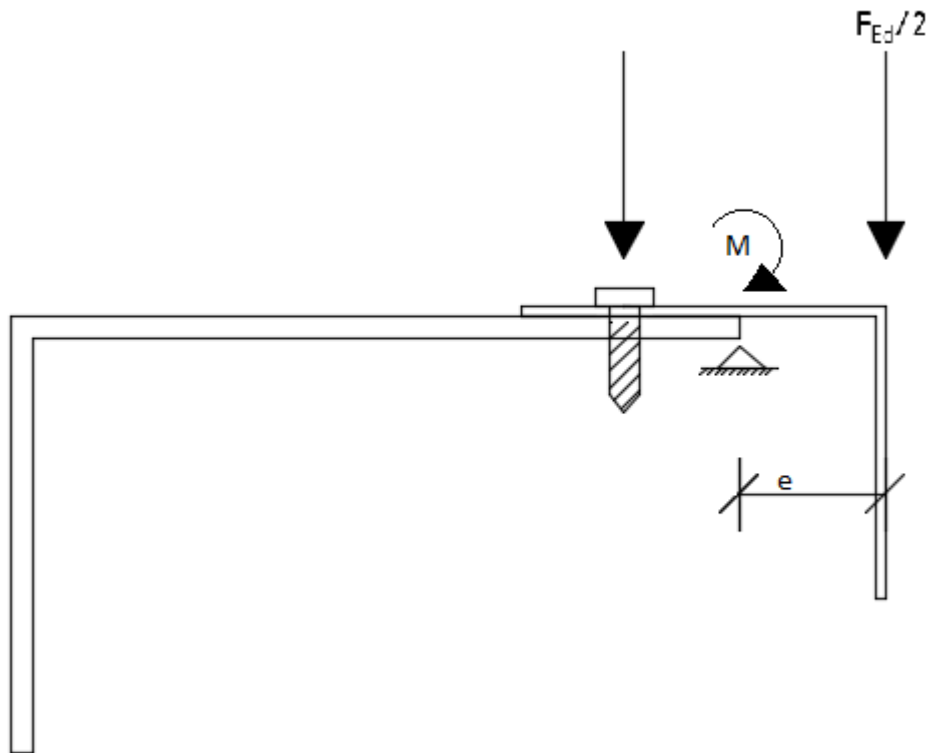
Vaakaorren kuormitusta aiheuttavat voimat ovat tuulikuorma sekä hattuorsien ja verhouslevyn omat painot. Tukireaktioita syntyy kulmarautojen ja hattuorsien kanssa.



KUVA 18. RAKENNE VAAKAORREN YMPÄRILLÄ

Mikäli hattuorret sijoitetaan vaakasuunnassa samaan linjaan kulmarautojen kanssa, tuulikuorma rasittaa lähinnä vaakaorren kiinnityskohtia, eikä sitä tutkita tässä kohtaa sen enempää (liitosten mitoitus luvussa 7.4). Rakenteiden omat painot (G) pyrkivät taivuttamaan vaakaortta alas. Suurin taivutusmomentti syntyy kohtaan, mihin kulmarauta loppuu.

7.2.1 Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus



KUVA 19. VAAKAORTEEN SYNTYVÄ MOMENTTI

$$F_{Ed} = 1,35(s_1 \cdot s_2 \cdot g_1 + s_2 \cdot g_2)$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot e$$

missä

- s_1 on hattuorsien k-k jako
- s_2 on vaakaorsien k-k jako
- g_1 on verhouslevyn paino [kN/m²]
- g_2 on hattuorren paino [kN/m]
- e on epäkeskisyys (ks. kuva 19)

Lasketaan W_{eff} niin, että vain kulmaraudan kohdalla oleva vaakaorsi ottaa vääntöä vastaan, jolloin b = kulmaraudan leveys. Tällöin taivutusvastus lasketaan kaavoilla (SFS-EN 1993-1-1, 53):

$$W_{eff} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

missä

W_{eff}	on vaakaorren tehollinen taivutusvastus
b	on kulmaraudan leveys (taivutusta vastaanottava leveys)
h	on vaakaorren paksuus
$M_{c,Rd}$	on vaakaorren taivutuskestävyys

Mitoitusehto:
$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

7.2.2 Tuulikuorman aiheuttama rasitus

Mikäli kulmaraudat ovat vaakasuunnassa eri linjassa hattuorsien kanssa, aiheuttaa tuulikuorma vaakaorsiin taivutusrasitusta. Vaakaorren taivutuskestävyys mitoitetaan kuten hattuorsi luvuissa 7.1.1.1 ja 7.1.2.1. Taivutusrasituksen ja profiilin tehollisen poikkipinta-alan laskeminen tapahtuu samalla periaatteella kuin edellä mainituissa luvuissa.

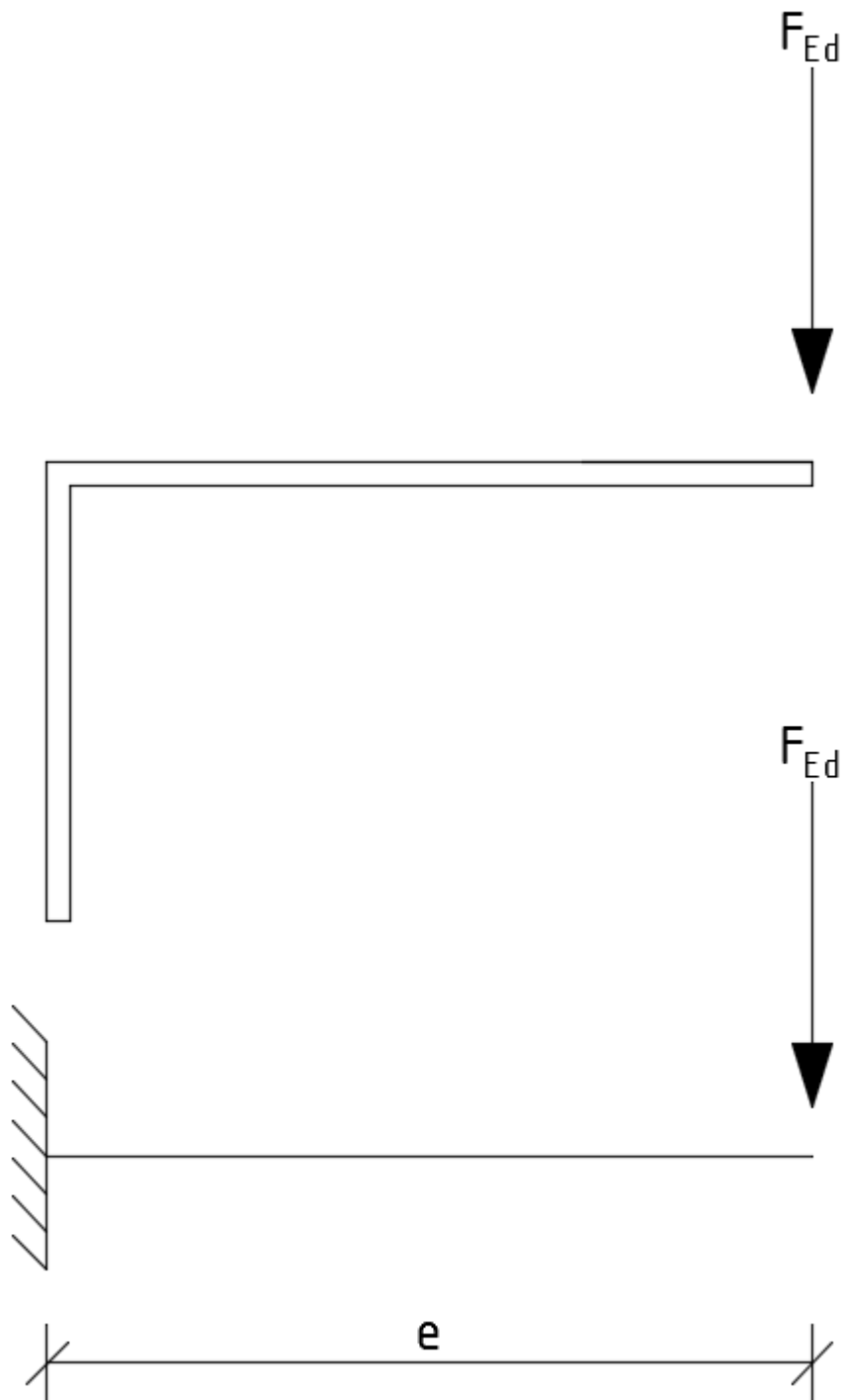
Mitoituksen yksinkertaistamisen vuoksi rakenne ajatellaan yksiaukkoiseksi. Laskennassa tulee huomioida, että vaakaorren molemmat laipat ovat ”yhdeltä reunalta tuettuja taso-osia”.

7.3 Kulmarauta

Kulmaraudalle kriittiset rasitukset ovat orsien, eristyksen ja levytyksen paino, sekä tuulenimu.

7.3.1 Rakenteiden omien painojen aiheuttama rasitus

Yksinkertaistetaan kuormituksen muodostamista siten, että kaikki pystysuuntainen kuormitus kohdistuu kulmaraudan päähän, jolloin laskennassa ollaan varmallalla puolella. Ajatellaan kulmaraudan rakennemalli sellaiseksi, että se on toisesta päästä jäykästi sidottu uloke.



KUVA 20. KULMARAUDAN PYSTYSUUNTAINEN KUORMITUS

Kulmaraudan taivutuskestävyys lasketaan seuraavasti (SFS-EN 1993-1-1, 53):

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot (g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + g_2 \cdot s_2 + g_3 \cdot s_3 + g_4 \cdot s_2 \cdot s_3)$$

$$M_{Ed} = F_d \cdot e$$

$$W_{eff} = \frac{b \cdot h^3}{6}$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

missä

F_{Ed} on pystysuuntainen kuormitus murtorajatilassa

g_1 on verhoulevyn paino

g_2 on hattutorren paino

g_3 on vaakaorren paino

g_4 on lisälämmöneristyksen paino

s_1 on hattuersien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako

s_3 on kulmarautojen vaakasuuntainen k-k jako

M_{Ed} on maksimi taivutusmomentti

e on kulmaraudan pituus (ks. kuva 6, mitta 2)

W_{eff} on tehollinen taivutusvastus

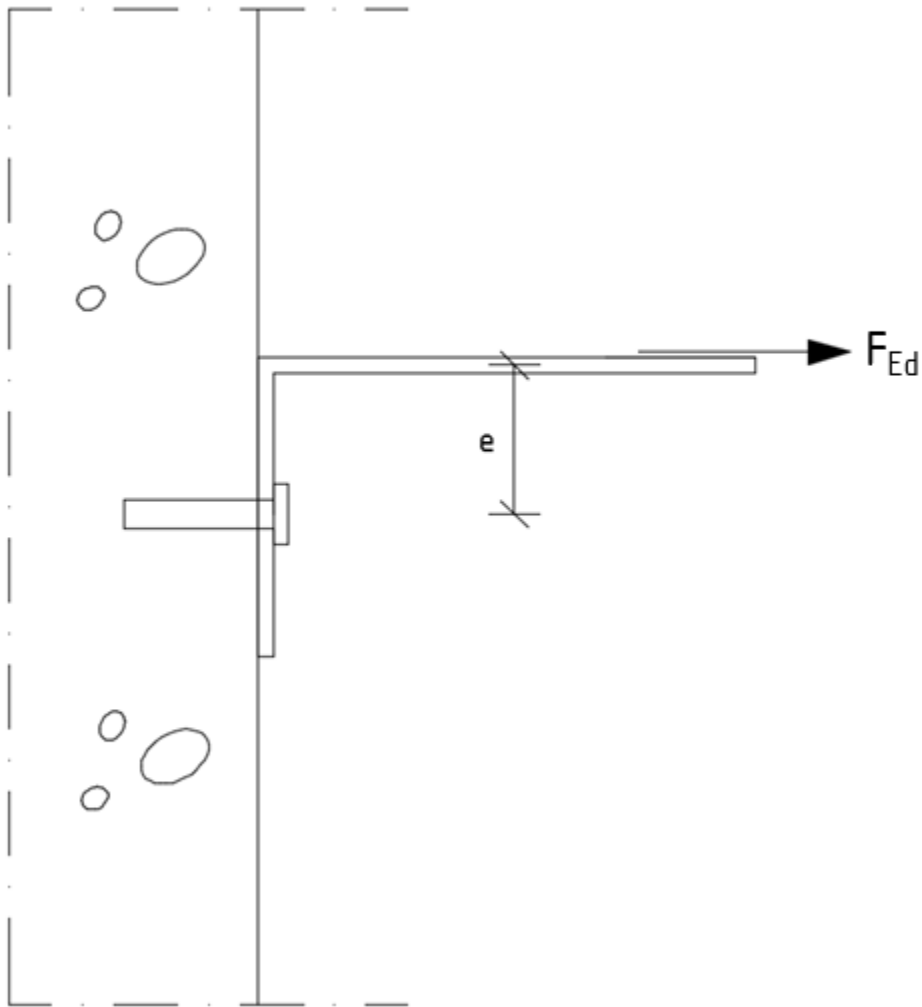
b on kulmaraudan leveys

h on kulmaraudan paksuus

Mitoitusehto: $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$

7.3.2 Tuulenimun aiheuttama rasitus

Tuulenimu pyrkii vetämään kulmarautaa irti seinästä ja kulmarautaan kohdistuu taivutusmomentti kiinnityksen juureen. Taivutuskestävyys lasketaan samoin kuin edellisessä kohdassa.



KUVA 21. KULMARAUDAN VAAKASUUNTAINEN KUORMITUS

$$F_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_2 \cdot s_3$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot e$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

missä

F_{Ed} on vaakasuuntainen kuormitus murtorajatilassa

$q_{w,d}$ on maksimi tuulenimu murtorajatilassa

s_2 on vaakaaorsien k-k jako

s_3 on kulmarautojen vaakasuuntainen k-k jako

e on kuormituksen etäisyys kiinnityskohdasta

M_{Ed} on maksimi taivutusmomentti

M_{Rd} on taivutuskestävyys (sama kuin edellisessä kohdassa)

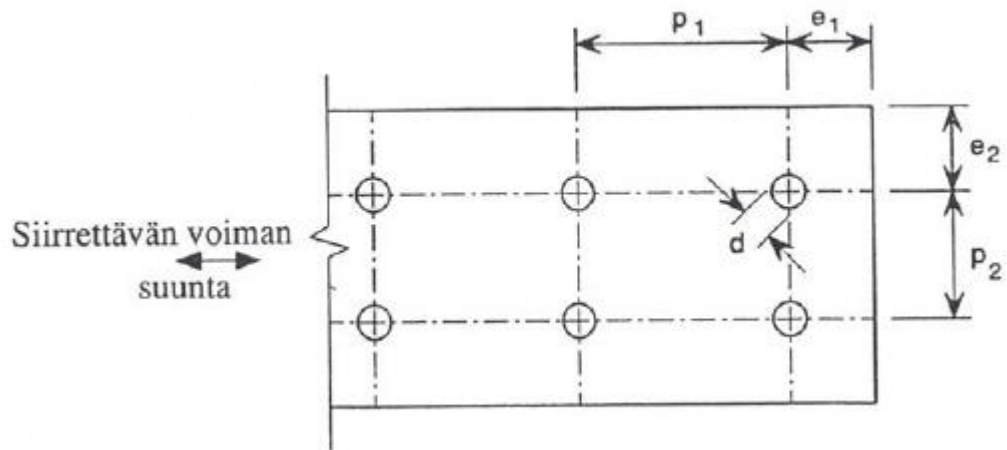
$$\text{Mitoitusehto: } \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

7.4 Liitosten mitoitus

Mitoitetaan liitokset SFS-EN 1993-1-3 + AC mukaan. Oletetaan, että kaikissa liitoksissa käytetään itsekierteittäviä poraruuveja. Tällöin ruuvien kestävyysmitoitussarvot ovat:

TAULUKKO 8. RUUVIEN KESTÄVYYKSIEN MITOITUSARVOT (SFS-EN 1993-1-3 + AC, 64)

Leikkauksen kuormittamat ruuvit:	
<u>Reunapuristuskestävyys:</u> $F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$	
missä α lasketaan seuraavasti - kun $t = t_1$ $\alpha = 3,2\sqrt{t/d}$, mutta $\alpha \leq 2,1$ - kun $t_1 \geq 2,5 t$: $\alpha = 2,1$ - kun $1 < t_1/t \leq 2,5$: α :n arvo lasketaan lineaarisesti interpoloimalla	
<u>Nettopoikkileikkauksen kestävyys:</u> $F_{n,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$	
<u>Leikkauskestävyys:</u> Leikkauskestävyys $F_{v,Rd}$ määritetään kokeellisesti.	
<u>Ehdot:</u> $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{b,Rd}$ ja $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$	
Vedon kuormittamat ruuvit:	
<u>Läpivetokestävyys:</u> ²⁾	
-staattiselle kuormalle:	$F_{p,Rd} = d_w \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2}$
-toistuvan tuulikuorman rasittamat ruuvit:	$F_{pr,Rd} = 0,5 \cdot d_w \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2}$
<u>Ulosvetokestävyys:</u> $F_{o,Rd} = 0,65 \cdot d \cdot t_{sup} \cdot f_{u,sup} / \gamma_{M2}$	
<u>Vetokestävyys:</u> Vetokestävyys $F_{t,Rd}$ määritetään kokeellisesti.	
<u>Ehdot:</u> $F_{t,Rd} \geq n F_{p,Rd}$ ja $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$	
Pätevyysalue: ³⁾	
<u>Yleensä:</u> $e_1 \geq 3d$ $p_1 \geq 3d$ $2,6 \text{ mm} \leq d \leq 6,4 \text{ mm}$ $e_2 \geq 1,5 d$ $p_2 \geq 3d$	
<u>Vedolle:</u> $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$ ja $t_1 \geq 0,9 \text{ mm}$	
¹⁾ Tässä taulukossa oletetaan, että ruvin muotoiltu pää sijaitsee ohuimman levyn puolella.	
²⁾ Tässä oletetaan, että aluslaatat ovat riittävän jäykkiä estämään sen merkittävät muodonmuutokset tai lävistymisen kiinnittimen pään lävitse	
³⁾ Itsekierteittäviä ruuveja voidaan käyttää näiden rajojen ulkopuolella, jos kestävyys määritetään kokeellisesti luvun 9 mukaan.	



KUVA 22. KIINNITTIMIEN PÄÄTYETÄISYYS, REUNAETÄISYYS JA KESKIÖIDEN VÄLINEN ETÄISYYS (SFS-EN 1993-1-3 + AC, 61)

Kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa kiinnityksen kestävyden mitoitusarvon tulee olla suurempi kuin kuormituksen murtorajatilassa. Yhdistetyn leikkauksen ja vedon tapauksessa liitoksen kestävyden tulee täyttää ehto (SFS-EN 1993-1-3 + AC, 62):

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1$$

missä

- $F_{t,Ed}$ on kiinnitykseen kohdistuva vetovoima
- $F_{t,Rd}$ on kiinnityksen kestävyys vetoa vastaan
- $F_{v,Ed}$ on kiinnitykseen kohdistuva leikkausvoima
- $F_{v,Rd}$ on kiinnityksen kestävyys leikkausta vastaan

7.4.1 Verhouslevyn kiinnitys hattuorkeen

Leikkausta kiinnityksille aiheuttaa verhouslevyn oma paino.

$$V_{Ed} = 1,35 \cdot g_1 \cdot s_1 \cdot k_1$$

missä

- g_1 on verhouslevyn oma paino
- s_1 on hattuorsien k-k jako

k_l on ruuvien k-k jako

Vetoa ruuveille aiheuttaa tuulenimu.

$$F_{t,Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 \cdot k_l$$

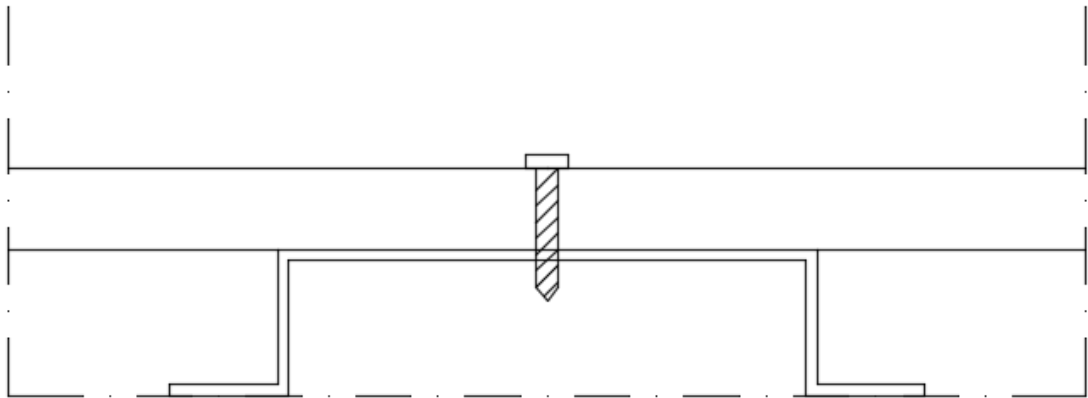
missä

$q_{w,d}$ on maksimi tuulenimu murtorajatilassa

s_1 on hattuorsien k-k jako

k_l on ruuvien k-k jako

Läpivetokestävyyttä ei voida laskea taulukon 8 kaavalla. Ruuvien kiinnitysväli määritetään verhoulevyn valmistajan ohjeiden mukaan.



KUVA 23. VERHOUSLEVYN KIINNITYS HATTUORTEEN

7.4.2 Hattutorren kiinnitys vaakaorteen

Leikkausta kiinnityksille aiheuttaa verhoulevyn ja hattuorsien omat painot.

$$V_{Ed} = (1,35(g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + g_2 \cdot s_2)) / x$$

missä

g_1 on verhoulevyn oma paino

g_2 on hattutorren oma paino

s_1 on hattuorsien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako

x on ruuvien määrä / risteyskohta

Vetoa ruuveille aiheuttaa tuulenimu.

$$F_{t,Ed} = (q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2) / x$$

missä

$q_{w,d}$ on maksimi tuulenimu murtorajatilassa

s_1 on hattuorsien k-k jako

s_2 on vaakaorsien k-k jako

x on ruuvien määrä / risteyskohta



KUVA 24. HATTUORREN KIINNITYS VAAKAORTEEN

7.4.3 Vaakaorren kiinnitys kulmarautoihin

Leikkausta kiinnityksille tuulikuorma (tuulenpaine tai tuulenimu).

$$V_{Ed} = (q_{w,d} \cdot s_2 \cdot s_3)$$

missä

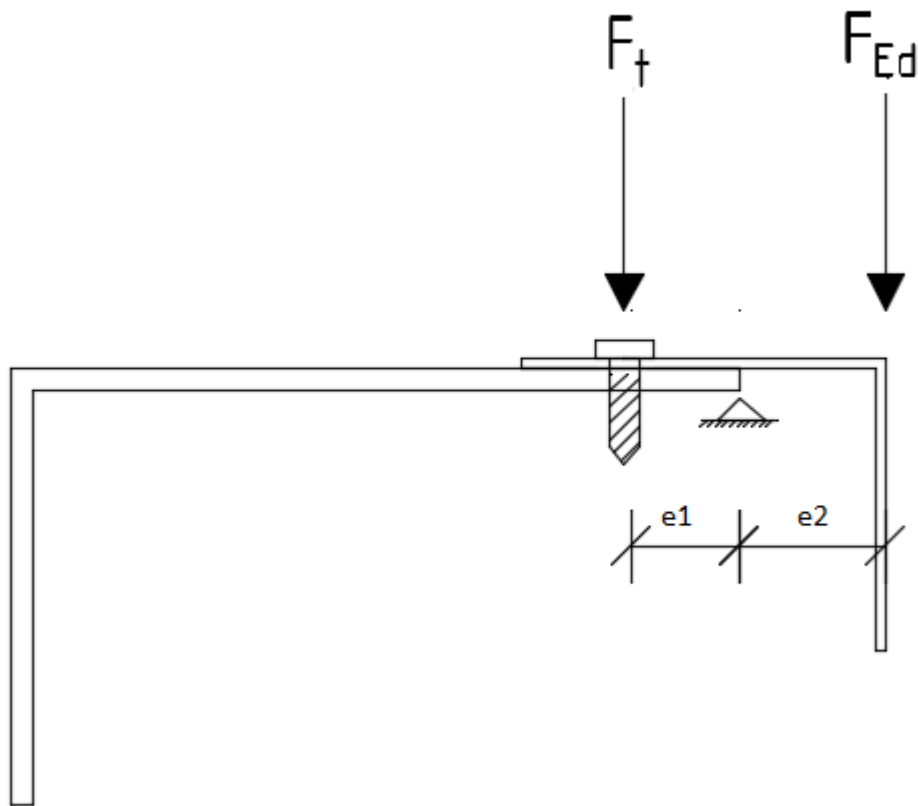
$q_{w,d}$ on maksimi tuulikuorma murtorajatilassa

s_2 on vaakaorsien k-k jako

s_3 on kulmarautojen vaakasuuntainen k-k jako

Vetoa ruuveille aiheuttaa liitoksessa syntyvä momentti: Ajatellaan vaakaorren tukipisteeseen olevan kulmaraudan päässä, jolloin vaakaorren kannattama paino pyrkii nostamaan

orren seinää lähimpänä olevan osan ylös. Tällöin liitoksessa olevaan ruuviin kohdistuu vetoa



KUVA 25. LIITOKSESSA VAIKUTTAVAT VOIMAT

$$F_{Ed} = 1,35(g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + g_2 \cdot s_2)$$

missä

- g_1 on verhouslevyn paino
- g_2 on hattuorren paino
- s_1 on hattuorsien k-k jako
- s_2 on vaakaorsien k-k jako

Jolloin liitoksen momenttitasapainon perusteella:

$$F_{t,Ed} \cdot e_1 = F_{Ed} \cdot e_2$$

$$F_{t,Ed} = \frac{F_{Ed} \cdot e_2}{e_1}$$

missä

e_1 on ruuvien etäisyys kulmaraudan päästä

e_2 on vaakaorren reunan etäisyys kulmaraudan päästä

7.5 Rakenteen ankkurointi betoniin

Vanhan rakenteen ankkuroinnin kestävyyttä ei voida suoraan laskea millään kaavalla vaan kestävyys tulee määrittää kokeellisesti. Kokeellisesti mitoitetaan siis kulmarautojen kiinnitys vanhaan ulkokuoreen, sekä betonisen ulkokuoren ankkurointi sandwichelementin sisäkuoreen.

Koe on tyypiltään semmoinen, että sillä selvitetään suoraan rakenteen tai rakenneosan kestävyys murtorajatilassa. Koe voidaan suorittaa myös väsyttävälle kuormille. Koetyypin osalta käytettävät mitoitussarvot johdetaan koetuloksista hyväksytyjä tilastollisia menetelmiä käyttäen. (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 160-166).

Koe tulee suunnitella etukäteen ja tutkimussuunnitelmassa tulee määrittää:

- tavoitteet ja laajuus
- koetulosten ennuste
- koekappaleiden määrittely ja näytteenotto
- kuormittamista koskevat määrittelyt
- koejärjestelyt
- mittaukset
- kokeiden arviointi ja testausselostet.

Rakenteen tai rakenneosan kestävyuden mitoitussarvo johdetaan määrittämällä mitoitussarvo suoraan siten, että tulokset muunnetaan tietyllä tavalla ottaen huomioon tarvittava kokonaisluotettavuus. (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 160-166).

Rakenteen kestävyuden mitoitussarvo lasketaan kaavalla (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 172):

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x)$$

$$V_x = \frac{s}{m_x}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{n-1}}$$

missä

F_{Rd}	on ankkurin mitoituskestävyys
η_d	on kokonaisvarmuuskerroin betonille
m_x	on kokeiden keskiarvotulos
$k_{d,n}$	on kerroin, ks. taulukko 9
V_x	on kokeiden variaatiokerroin
s	on keskihajonta
x_i	on yksittäinen koetulos
x	on kokeiden keskiarvotulos
n	kokeiden lukumäärä

TAULUKKO 9. KERTOIMEN $k_{d,n}$ ARVOT MURTORAJATILAN MITOITUSTA VARTEN (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 172)

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x tunnettu	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04

HUOM. Tämä taulukko perustuu oletukseen, että mitoitusarvo vastaa tuloa $\alpha_R \beta = 0,8 \times 3,8 = 3,04$ (ks. SFS-EN 1990 + A1 + AC liitettä C) ja että X on normaalijakautunut. Tämä johtaa noin 0,1 % suuruisen todennäköisyyteen sille, että todellinen arvo on pienempi kuin mitoitusarvo.

Betonin puristuskestävyyden mitoitusarvo saadaan kaavasta (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 35):

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

missä

f_{cd} on betonin puristuskestävyyden mitoitusarvo

$$f_{ck} = f_{cm} - k \cdot s$$

f_{ck} on betonin puristuskestävyyden ominaisarvo

f_{cm} on betonin puristuskestävyyksien keskiarvo

Sieventämällä kaavaa $F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x)$ saadaan:

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x) \mid V_x = \frac{s}{m_x}$$

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x \left(1 - k_{d,n} \cdot \frac{s}{m_x}\right)$$

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x - k_{d,n} \cdot s$$

Koska $f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, on η_d :n oltava $\frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c}$

Koska tässä tapauksessa tutkitaan betonin murtumista normaalitilanteessa, käytetään betonin γ_c :na SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC mukaista 1,5:ä.

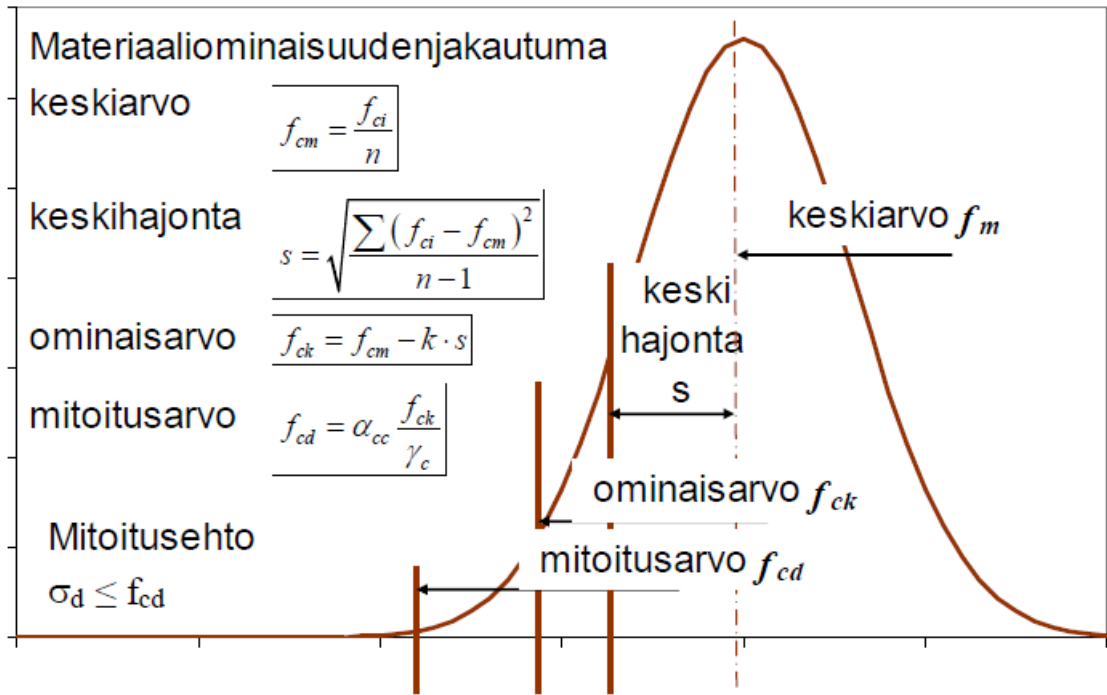
TAULUKKO 10. MURTORAJATILOJEN MATERIAALIOSAVARMUUSLUVUT

Mitoitustilanteet	betonin γ_c	betoniteräksen γ_s	jänneteräksen γ_s
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0	1,0

α_{cc} on kansallisesti määritelty kuorman pitkäaikaisen vaikutuksen ja kuorman rakenteelle siirtymisen epäedulliset vaikutukset huomioiva kerroin. Suomessa α_{cc} :n arvoksi on määritetty 0,85. (Nykyri 2011, 31)

$$\eta_d = \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} = \frac{0,85}{1,5} = 0,567$$

Tällöin rakenteen kokonaisvarmuuden muodostavat materiaaliosavarmuusluku, kuormien osavarmuusluvut, sekä tilastollisen menetelmän tuottama varmuus.



KUVA 26. MATERIAALIOMINAISUUKSIEN JAKAUMA (Nykyri Pekka. 2011, Betonirakenteiden suunnittelu: perusteet (luentomateriaali), 27)

7.6 Rakenteen U-arvo

Lisälämmöneristettäessä alkuperäinen U-arvo on puolitettava (ei kuitenkaan alle 0,17 W/m²K = uuden rakennuksen vähimmäisvaatimus) (Pekkarinen-Kanerva 2014, 17).

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan käyttämällä

- CE merkinnällä varustetuille rakennusaineille EN-standardien mukaan määritetyjä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja
- normaalisen lämmönjohtavuuden (λ_n) arvoja
- tai muita hyväksyttävällä tavalla määritettyjä, rakennusosalle soveltuvia lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja. (RakMK C4 2002.)

Lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla (RakMK C4 2002, 5):

$$U = \frac{1}{R_T}$$

missä

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön. Yksikkö on (m²·K)/W.

Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-aineisia ja lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus R_T kaavalla (RakMK C4 2002, 5):

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

missä

R_{si} on sisäpuolinen pintavastus

R_{se} on ulkopuolinen pintavastus

R_n on ainekerroksen lämmönvastus

Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus lasketaan kaavalla (RakMK C4 2002, 5)

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

missä

d on ainekerroksen paksuus

λ on ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus

TAULUKKO 11. SISÄ- JA ULKOPUOLINEN PINTAVASTUS R_{si} JA R_{se} (RakMK C4 2003, 16)

Sisäpuolinen pintavastus R_{si} , (m ² · K)/W			Ulkopuolinen pintavastus R_{se} , (m ² · K)/W		
Lämpövirran suunta					
vaakasuora	ylöspäin	alaspäin	vaakasuora	ylöspäin	alaspäin
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Väliarvot 0°–90° saadaan lineaarisesti interpoloimalla.

8 MITOITUSOHJELMAN TEKEMINEN

Aloitin ohjelman tekemisen mielestäni selkeimmästä asiasta eli liitosten mitoituksesta. Samalla oli hyvä harjoitella Excelin käyttämistä ja kaavojen muodostamista. Heti aluksi tuli selväksi, että Excelin JOS-funktio on elintärkeä ohjelmaa tehdessä. JOS-funktion avulla saa huomioitua laskennan eri skenaariot. Helpointa tätä on valaista esimerkin kautta:

Ohutlevyjen liitosten mitoituksessa (taulukko 8) α saa eri arvoja liitettävien levyjen paksuuksien suhteesta riippuen. Muodostin kaavan α :n laskemiselle siten, että jokaiselle eri vaihtoehdolle ($t = t_1$, $t_1 \geq 2,5 t$, $1 < t_1/t \leq 2,5$) oli oma solu. Mikäli ehto (esim. $t = t_1$) ei toteutunut, sai solu arvon 1. Tällöin vain yhdessä solussa oli jokin muu arvo kuin 1 ja solut voitiin kertoa yhteen, jolloin solujen tulo vastasi todellista α :aa. Monet muutkin kohdat vaativat vastaavanlaista kikkailua, jotta laskuista saadaan automaattisesti yksiselitteinen lopputulos. Helpompi tapa olisi voinut olla laskea määrättyille profiileille kestävyksiä ja tallentaa tiedot eräänlaiseksi ”kirjastoksi”, minkä avulla rakenteen kestävyden saisi laskettua. Vaikeammalla tavalla saatu lopputulos on kuitenkin parempi, koska suunnittelija voi vapaasti määrittää profiilien poikkileikkauksille mitat.

Totesimme projektin alkuvaiheessa ohjaavan opettajan kanssa, että kannattaa ensiksi mitoittaa jokin esimerkkirakenne, missä ei ole lainkaan muuttujia, jotta saa käsityksen mitä kaikkea mitoituksessa tulee ottaa huomioon ja mitä laskuja siihen tulee. Esimerkkilasku olikin hyödyllinen työvaihe ja sen muodostamisen jälkeen ohjelman jatkaminen oli helppoa. Erityisesti lähtötietosivu oli hyvä saada aikaisessa vaiheessa lopulliseen muotoon, koska mitoituksessa kuitenkin viitataan lähtötietojen soluihin.

8.1 Käyttöliittymä

Ohjelman käytön kannalta on tärkeää, että käyttäjälle on selvää, mitä lähtötietoja ohjelmaan tulee syöttää ja mitä eri kohdat tarkoittavat. Ohjelma on tehty niin, että ne solut, joihin käyttäjän odotetaan syöttävän lähtötietoja, on väritetty vaalean vihreäksi. Excelin kommenttityökalu oli kätevä selventävien tekstien lisäämisessä. Kommenttityökalulla selventävän tekstin tai kuvan saa pomppaamaan ruudulle, kun hiiren kursorin liikuttaa kommentoidun solun päälle.

Käyttäjän ei tarvitse tehdä mitään muuta kuin syöttää lähtötiedot, jonka jälkeen ohjelma laskee automaattisesti tarvittavat laskut, joita voi tarkastella välilehdeltä ”mitoitus”. Tuulikuorman laskeminen on jätetty ohjelman käyttäjän laskettavaksi. Tuulikuorman laskemiseksi automaattisesti tarvittaisiin sovellus, joka osaisi lukea kuvaajaa (kuva 7) ja poimia oikea arvo sen perusteella. Tuulikuorman laskeminen yksinkertaistetulla menetelmällä on kuitenkin niin nopea toimenpide, ettei semmoisen sovelluksen kehittäminen tuntunut vaivan arvoiselta. Jokaisesta mitoitettavasta asiasta on viimeiseksi ilmoitettu käyttöaste. Käyttöaste-solut on muotoiltu niin, että kun käyttöaste on alle 100 %, on solu vihreä ja jos käyttöaste ylittää 100 %:n rajan, värjäättyy solu punaiseksi. Solujen väreistä on helppo tarkistaa täyttääkö rakenne vaatimukset mitoituksen osalta.

Rakenteiden ankkurointi on omalla välilehdellään. Sinne pitää syöttää vetokokeiden määrä ja tulokset. Sen jälkeen käyttäjä syöttää taulukkoon elementtien mitat aukkoineen, jonka jälkeen ohjelma kertoo kuinka monta ankkuria kutakin elementtiä kohden vaaditaan. Myös U-arvon laskenta on omalla välilehdellään. U-arvon laskentaan käyttäjän tulee syöttää rakenteiden paksuudet, sekä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot. Yleisiä lämmönjohtavuuden (λ_D) mitoitusarvoja löytyy esimerkiksi RakMK C4:stä ja tuotekohtaisia arvoja löytyy valmistajien sivuilta. RakMK C4:n mitoitusarvot on myös liitetty osaksi laskentapohjaa, jolloin sieltä on helppo käydä tarkistamassa yleisimpiä lämmönjohtavuusarvoja.

8.2 Ohjelman ulkonäkö

Pyrin pitämään ohjelman ulkonäön mahdollisimman yksinkertaisena. Ulkonäössä tärkeää on saada ohjelmasta ulos selkeitä ja helposti luettavia tulosteita, joissa näkyy kaikki suunnittelun, mitoituksen ja toteutuksen kannalta oleellinen tieto.

Tiedot on otsikoitu ja järjestetty loogiseen järjestykseen, jolloin tiedon löytäminen ja lähtötietojen syöttäminen on helppoa ja nopeaa.

8.3 Ongelmat

Suurimmat vaikeudet olivat orsien mitoituksessa. Eurokoodissa on omat osionsa teräs-rakenteiden suunnittelulle, kylmämuovattujen sauvojen ja levyjen lisäsäännöille, sekä

levyrakenteiden suunnittelulle. Mitoitusohjeet ovat monin paikoin monimutkaisia, eikä rankojen mitoitukseen löytynyt kaikkia ohjeita yhdestä paikasta. Eri osioiden ohjeita piti yhdistellä ja rankojen mitoituksessa onkin hyödynnetty teräseurokoodin osia 1, 3, 5 ja 8.

Monimuotoiset kaavat aiheuttivat haasteita myös Excelin puolella, sillä soluihin joutui tekemään paikoin erittäinkin pitkiä kaavoja. Kaavoissa viitataan paljon tiedoston muihin soluihin ja virheellisen kaavan kirjoittaminen on todellinen riski. Esimerkkilaskelma auttaa tarkistamisessa, mutta silti jotain voi jäädä huomaamatta.

Toinen asia, mikä vaikeutti projektia oli se, ettei tämän tyyppisten rakenteiden Eurokoodin mukaiseen mitoittamiseen ole koostettu minkäänlaisia ohjeita, eikä mitoittamista käsitteleviä julkisia teoksia tahtonut löytyä. Tämä johti siihen, että kaikki mitoittamiseen liittyvät asiat piti löytää ja päätellä Eurokoodeista itse, eikä ollut oikein paikkaa, mistä tarkistaa onko asian ymmärtänyt oikein.

Työtä olisi helpottanut, mikäli rankarakenteiden kanssa olisi ollut tekemisissä aikaisemmin. Ensikosketus rankarakenteiden suunnitteluun tuli vasta opinnäytetyötä tehdessä, joten profiilien paksuuksien ja muiden mittojen suuruusluokista ei ollut kunnollista näppituntumaa. Tästä johtuen tulosten oikeellisuuden ja järkevyyden arviointi oli haastavaa.

9 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia rankarakenteisen lisälämmöneristysrakenteen kantavuusmitoittamista ja tehdä Excelin avulla laskentapohja mitoitusta varten. Tavoitteessa onnistuttiin, mutta mitoittaminen osoittautui monimutkaisemmaksi kuin mitä olin olettanut. Esimerkiksi vakioitujen teräspilareiden ja –palkkien mitoittaminen on huomattavasti suoraviivaisempaa ja yksinkertaisempaa kuin ohutlevyorsien. Erityistä haastetta aiheutti hattuorren sekä vaakaorren tehollisen poikkipinta-alan huomioiminen taivutusmitoituksessa ja laskukaavojen saaminen laskentapohjaan.

Oppimisen ja toisaalta tutkimisen kannalta hyödyllistä olisi ollut, mikäli rankarakenteita olisi päässyt koekuormittamaan laboratorioon. Ilman käytännön kokeita on hankala hahmottaa miten rakenne hajoaisi, kun sitä tarpeeksi paljon kuormitetaan. Koeistus auttaisi myös laskennan oikeellisuuden arvioinnissa ja samalla tuloksia voisi verrata laskennallisiin kestävyyksiin. Nyt laskennan kokonaisvarmuudesta ei ole selvää kuvaa. Erityisesti lukuun 7.1.2.2 ”laippoihin kohdistuva vääntö” valittu laskentamalli jättää kysymysmerkkejä ilmaan. Laskentamalli on tarkoitettu H-mallisten pilareiden mitoittamiseen. Hattuorsi poikkeaa H-mallisesta poikkileikkauksesta siten, että uuman päässä laippa jää vain uuman toiselle puolelle, kun taas H-mallisessa poikkileikkauksessa laippa on uuman pään molemmilla puolilla. Löydetty laskentamalli oli kuitenkin eniten kyseessä olevaa tilannetta muistuttava.

Näin laajan Excel-pohjan tekeminen on suuri urakka, joten laskentapohjalle tulee olla oikeasti käyttöä, jotta sen tekeminen kannattaa. Toisaalta laskentapohja on melko helpposti muokattavissa ja laajennettavissa, jolloin sitä voidaan käyttää monenlaisiin kohteisiin. Suuri määrä betonisandwichrakenteisia kerrostaloja on nyt julkisivun osalta korjauksissa ja rankarakenteisia korjauksia tehdään paljon. Toteutettavia kohteita riittää tällä hetkellä ja tulevaisuudessa, joten siitä laskentapohjan tarpeellisuus ei todennäköisesti jää kiinni.

Markkinoilla tuntuu yleistyvän eri valmistajien omat rankajärjestelmät. Esimerkiksi Hiltin Eurofox –järjestelmä on jo yleisesti käytössä. On todennäköistä, että valmiiden tuotteiden yleistyessä niiden hinnatkin alkavat putoamaan. Nähtäväksi jää, kuinka pitkään rankojen suunnitteleminen itse ja niiden tilaaminen metallipajalta on kannattavaa.

LÄHTEET

C4 Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. Ympäristöministeriö 2002.

SFS-EN 1990 + A1 + AC Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto 2006.

SFS-EN 1991-1-1 + AC Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Suomen Standardisoimisliitto 2002.

SFS-EN 1991-1-4+ AC + A1 Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Suomen Standardisoimisliitto 2011.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Eurokoodi. Betonirakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto 2015.

SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi. Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto 2005.

SFS-EN 1993-1-3 + AC Eurokoodi. Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Suomen Standardisoimisliitto 2006.

SFS-EN 1993-1-5 Eurokoodi. Teräsrakenteiden suunnittelu, levyrakenteet. Suomen Standardisoimisliitto 2006.

SFS-EN 1993-1-8 Eurokoodi. Teräsrakenteiden suunnittelu. Liitosten mitoitus. Suomen Standardisoimisliitto 2005.

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2011.

Kinnunen, J., Saarinen, E., Tiira, S., Ulvinen, S. & Väänänen, E. 2001. Teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Rakennustietosäätiö Oy.

Tekniikan kaavasto. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka 2005.

Haukijärvi, M. 2005. JUKO – ohjeistokansio julkisivuhankkeen läpiviemiseksi. Korjaustapakuvaukset. Betonijulkisivut verhouskorjaus levyverhouksella – suunnitteluperusteet.

Kouhia, I., Nieminen, J. & Pulakka, S. 2010. VTT-R-04017-10 Tutkimusraportti. Rakennuksen ulkovaipan energiakorjaukset. Tulostettu 10.3.2016.

www.vtt.fi/inf/julkaisut/2010/VTT-R-04017-10.pdf

Nykyri, P. 2011. Luentomateriaali. Betonirakenteiden suunnittelu, perusteet.

Puurakenteiden suunnittelu. Lyhennetty suunnitteluohje (kolmas painos). Puuinfo Oy 2011.

Pekkarinen-Kanerva, P. 2014. Korjausrakentamisen energiamääräykset. Helsingin rakennusvalvontavirasto. Tulostettu 11.3.2016.
http://www.hel.fi/static/rakvv/tilaisuudet/2014/taloyhtion_energiakorjaus/Taloyhtion_energiakorjaus_041114_Rakvv.pdf

HITSATUT PROFIILIT. EN 1993 –käsikirja. Ruukki 2010. Tulostettu 17.3.2016.
http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf

Teräsrakenteet. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Ympäristöministeriö 2015. Tulostettu 14.4.2016. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B085B813D-06C8-4891-A989-B460C099E122%7D/108383>

Liite 1. Mitoitusesimerkki

Rakenne:

1. Betoni sisäkuori 150 mm
2. Eriste 80 mm
3. Betoni ulkokuori 70 mm
4. Kulmarauta k 600 + lisälämmöneriste 100 mm
5. L-mallinen Vaakaorsi
6. Hattuorsi pystyyn
7. Ulkoverhouslevy

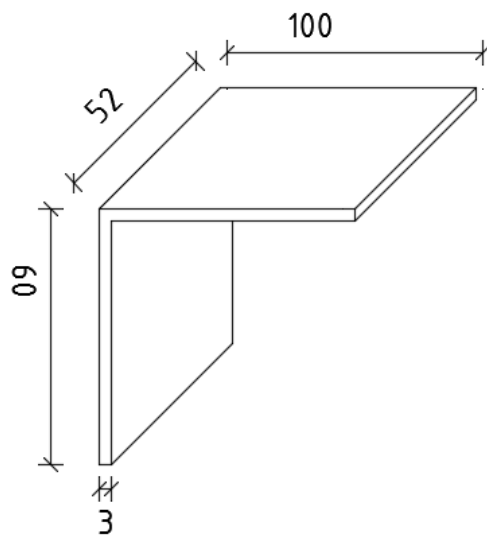
Hattuorsien jako k600

Vaakaorsien jako k600

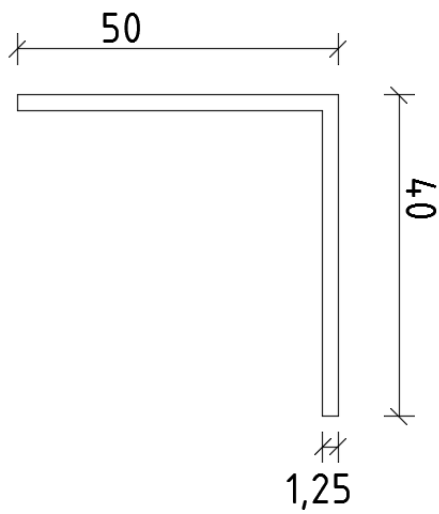
Kulmarautojen jako k600

Osien materiaali S350GD+Z

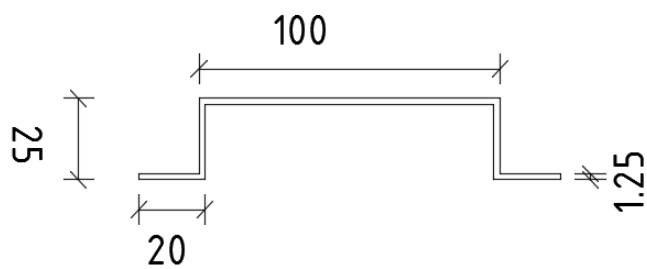
- $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$
- $f_u = 420 \text{ N/mm}^2$



KUVA L1/1 KULMARAUTA



KUVA L1/2 VAAKAORSI



KUVA L1/3 HATTUORSI

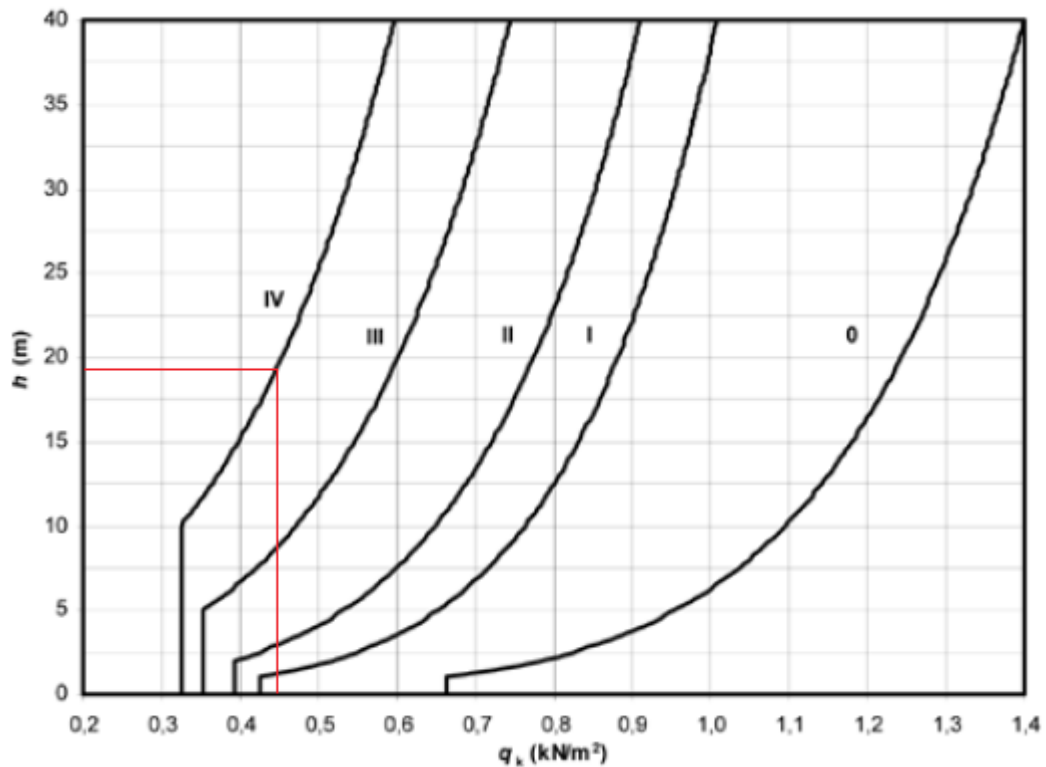
Verhouslevynä käytetään 12 mm paksua kuitusementtilevyä

Kuormat:

Rakennuksen korkeus $h = 18$ m

Maastoluokka 4

Nopeuspaineen ominaisarvo $q_k(h)$ puuinfo lyhennetty suunnitteluohje mukaan:



KUVA L1/4 TUULEN NOPEUSPAINEEN OMINAISARVO

$$q_k(h) = 0,44 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{w,k} = c_{p,net} \cdot q_k(h)$$

Suurin imu nurkka-alueilla: $c_{p,net} = -1,7$

Suurin imu keskialueilla: $c_{p,net} = -1,4$

Suurin paine sisäänpäin $c_{p,net} = +1,3$

(Käytetään laskennassa alle 1 m²:n alalle annettuja $c_{p,net}$ -arvoja, koska niitä suositellaan käytettäväksi, kun mitoitetaan rakenteiden kiinnityksiä ja rakenneosien ja verhousten taivutustarkasteluissa)

Tällöin:

Suurin imu nurkka-alueilla: $q_{w,k} = -0,75 \text{ kN/m}^2$

Suurin imu keskialueilla: $q_{w,k} = -0,62 \text{ kN/m}^2$

Suurin paine sisäänpäin $q_{w,k} = +0,57 \text{ kN/m}^2$

Tuulikuormat murtorajatilassa:

Suurin imu nurkka-alueilla: $q_{w,d} = -1,125 \text{ kN/m}^2$

Suurin imu keskialueilla: $q_{w,d} = -0,93 \text{ kN/m}^2$

Suurin paine sisäänpäin $q_{w,d} = +0,86 \text{ kN/m}^2$

Rakenteiden omat painot:

Verhouslevy paino $g_1 = 150 \text{ N/m}^2$

Hattuorsi paino $g_2 = 18,6 \text{ N/m}^2$

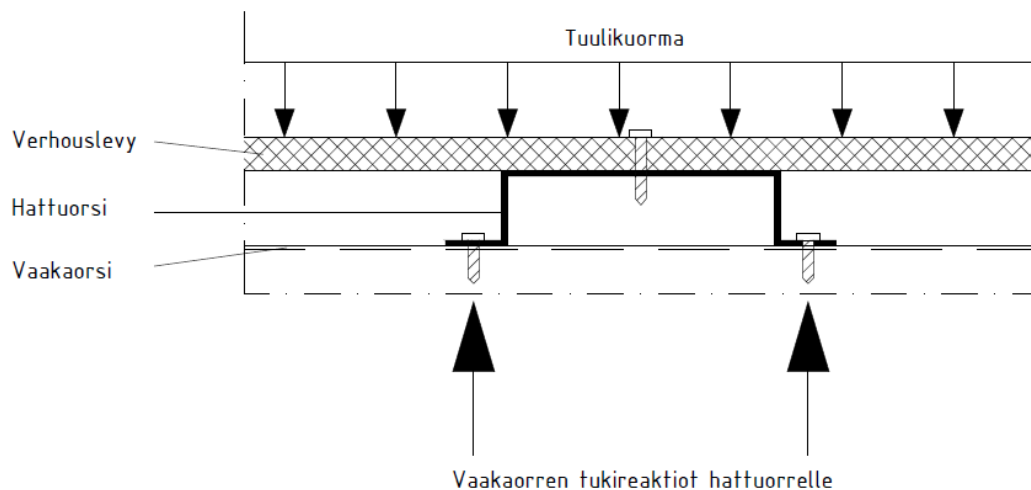
Vaakaorsi paino $g_3 = 8,83 \text{ N/m}^2$

Lisälämmöneriste paino $g_4 = 80 \text{ N/m}^2$

(Orsien painot laskettu orren poikkileikkauksen pinta-alan ja teräksen tiheyden tulona)

Orsien mitoitus:

Hattuorsi



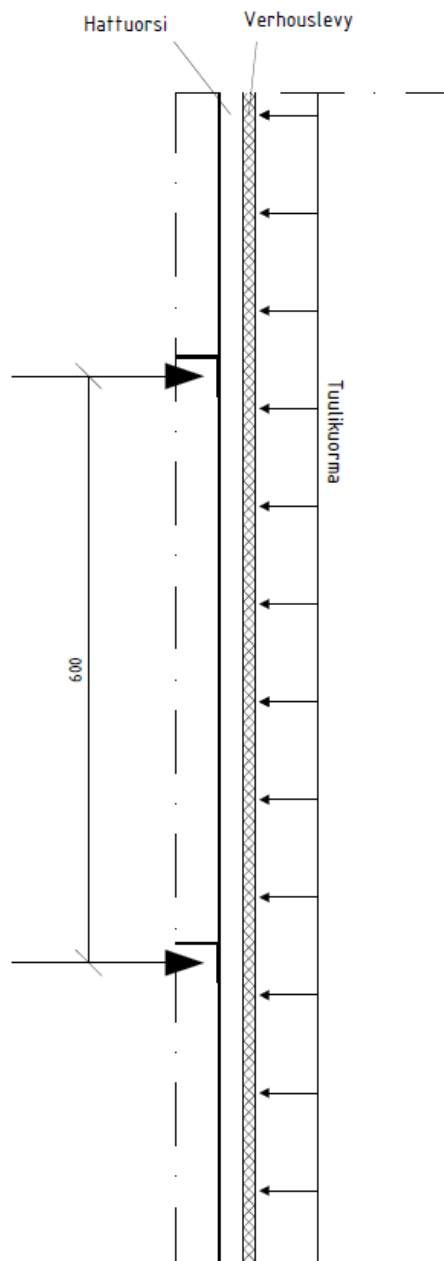
KUVA L1/5 HATTUORREN KUORMITUKSET JA TUKIREAKTIOT

Tuulenpaineen aiheuttama taivutus:

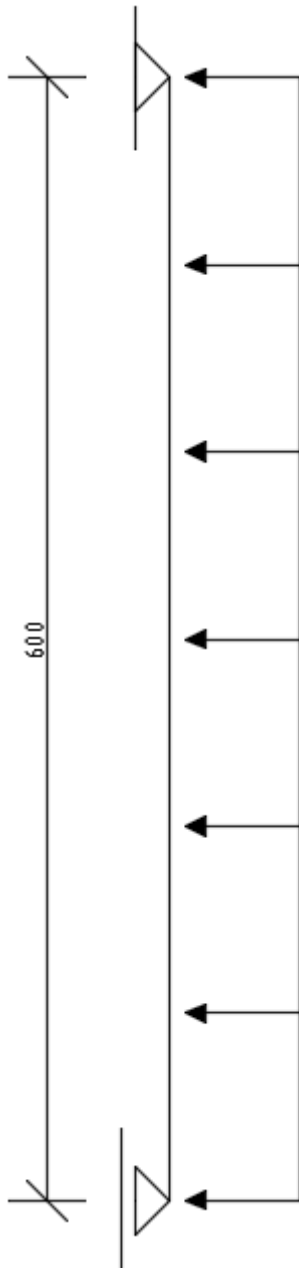
Puristuskuorma p_{Ed}

$$p_{Ed} = 0,6m \cdot 0,86kN/m^2 = 0,516kN/m$$

Tuulenpaine aiheuttaa hattutorrelle tasaista kuormaa. Mitoitetaan rakenne yksiaukkoisena, jolloin laskenta pysyy yksinkertaisena ja varman puolella.



KUVA L1/6 HATTUORREN KUORMITUS JA TUKIREAKTIOT

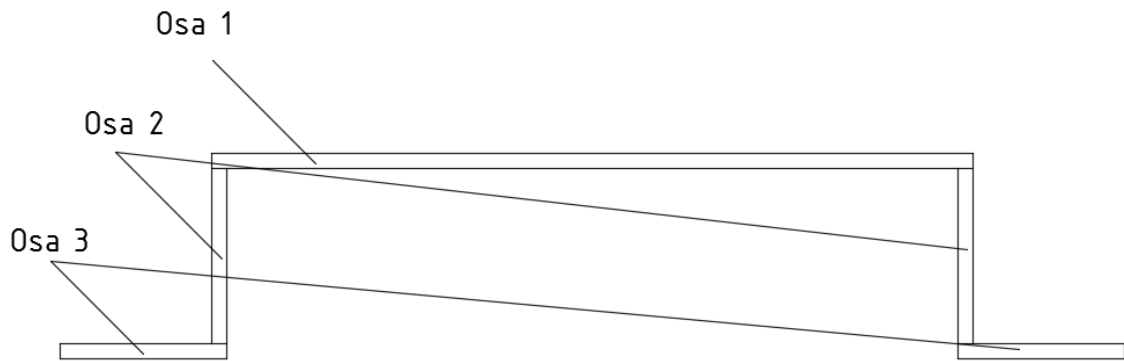


KUVA L1/7 YKSINKERTAISTETTU RAKENNEMALLI

$$M_{Ed, \max} = \frac{p_{Ed} L^2}{8} = \frac{0,516 \text{ N / mm} \cdot (600 \text{ mm})^2}{8} = 23220 \text{ Nmm}$$

$$p_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 = 0,86 \text{ kN / m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} = 0,516 \text{ kN / m} = 0,516 \text{ N / mm}$$

Profilin tehollinen poikkipinta-ala:



KUVA L1/8 HATTUORREN KOMPONENTTEIHIN JAKO

Profiilin verhouslevyä vasten oleva laippa (osa 1):

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{100/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{4}} = 1,71888$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$k_\sigma = 4,0$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,673$$

- >

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,71888 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{1,71888^2} = 0,507$$

$$\psi = 1$$

Jolloin $b_{eff,ylälaippa} = 0,507 \cdot 100\text{mm} = 50,7\text{mm}$

Vaakaortta vasten olevat laipat voidaan hyödyntää laskennassa kokonaan, koska ne ovat vedetyllä puolella

Uuma (osa 2):

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{25/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{27,9}} = 0,163$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = (-25 + 11,56) / 11,56 = -1,16$$

(tehollisen poikkileikkauksen painopisteen perusteella)

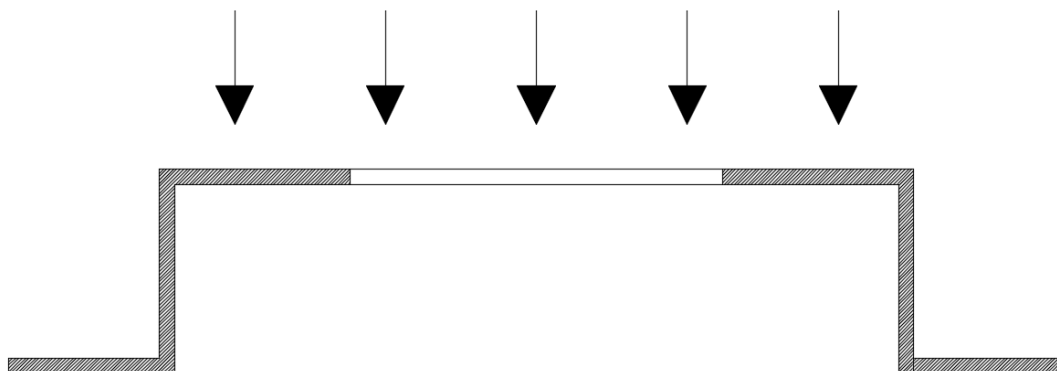
$$k_\sigma = 5,98(1 - 1,16)^2 = 27,9$$

$$\bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

- >

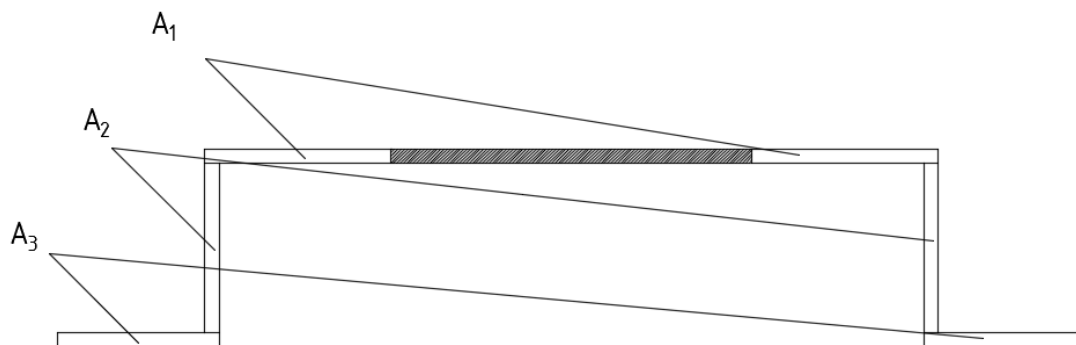
$$\rho = 1,0$$

- uuma voidaan hyödyntää laskennassa koko mitalta. Tällöin tehollinen poikkipinta-ala on:



KUVA L1/9 HATTUORREN TEHOLLINEN POIKKIPINTA-ALA TUULENPAINNEEN AIHEUTTAMA TAIVUTUSTA VASTAAN

Taivutusvastuksen laskeminen:



KUVA L1/10 KOMPONENTTEIHIN JAKO, TEHOLLINEN POIKKIPINTA-ALA

$$A_1 = 50,7\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 63,375\text{mm}^2$$

$$A_2 = 2 \cdot 22,5\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 56,25\text{mm}^2$$

$$A_3 = 2 \cdot 20\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 50\text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen painopiste (0-piste kuvassa L1/9 poikkileikkauksen yläreunassa):

$$y = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3}{A_{\text{kok}}} \\ = \frac{63,375\text{mm}^2 \cdot 0,625\text{mm} + 56,25\text{mm}^2 \cdot 12,5\text{mm} + 50\text{mm}^2 \cdot 24,375\text{mm}}{(63,375 + 56,25 + 50)\text{mm}^2} = 11,56\text{mm}$$

Aksiaalinen jäyhyysmomentti:

$$I_{z,\text{eff}} = I_1 + A_1 \cdot e_1^2 + I_2 + A_2 \cdot e_2^2 + I_3 + A_3 \cdot e_3^2 = 18223\text{mm}^4$$

$$I_1 = 2 \cdot \left(\frac{25,35\text{mm} \cdot (1,25\text{mm})^3}{12} \right) = 8,25\text{mm}^4$$

$$e_1 = 11,56\text{mm} - 0,625\text{mm} = 10,935\text{mm}$$

$$I_2 = 2 \cdot \left(\frac{1,25\text{mm} \cdot (22,5\text{mm})^3}{12} \right) = 2373\text{mm}^4$$

$$e_2 = 12,5\text{mm} - 11,56\text{mm} = 0,94\text{mm}$$

$$I_3 = 2 \cdot \left(\frac{20\text{mm} \cdot (1,25\text{mm})^3}{12} \right) = 6,51\text{mm}^4$$

$$e_3 = 24,375 - 11,56\text{mm} = 12,815\text{mm}$$

Taivutusvastus:

$$W_{z,\text{eff}} = I / e_{\text{max}} = 18212\text{mm}^2 / (25\text{mm} - 11,56\text{mm}) = 1356\text{mm}^3$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1356mm^3 \cdot 350N/mm^2}{1,0} = 474600Nmm > M_{Ed,max}, OK!$$

Taipuma:

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_k L^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(0,57kN/m^2 \cdot 0,6m) \cdot (600mm)^4}{211000N/mm^2 \cdot (18223mm^4)} = 0,15mm$$

Taipumaraja on $L/150 = 600\text{ mm} / 150 = 4\text{ mm} > f$, OK!

Tuulenimun aiheuttama taivutusmomentti:

$$M_{Ed,max} = \frac{p_{Ed} L^2}{8} = \frac{0,675N/mm \cdot (600mm)^2}{8} = 30375Nmm$$

$$p_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 = 1,125kN/m^2 \cdot 0,6m = 0,675kN/m = 0,675N/mm$$

Profiilin tehollinen poikkipinta-ala:

Profiilin vaakaortta vasten olevat laipat:

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{20/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{0,43}} = 1,05$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$k_\sigma = 0,43$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

-->

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,782$$

Jolloin $b_{eff,alalaiippa} = 0,782 \cdot 20mm = 15,64mm$

Verhouslevyä vasten oleva laippa voidaan hyödyntää kokonaan koska se on vedetyllä puolella.

Uuma:

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{25/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{12,77}} = 0,24$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = (7,87) / (-25 + 7,87) = -0,46$$

(tehollisen poikkileikkauksen painopisteen perusteella)

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,46) + 9,78(-0,46)^2 = 12,77$$

$$\bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

- >

$$\rho = 1,0$$

- Uuma voidaan hyödyntää laskennassa koko mitalta. Tällöin tehollinen poikkipinta-ala on:



KUVA L1/11 HATTUORREN TEHOLLINEN POIKKIPINTA-ALA TUULENIMUN AIHEUTTAMA TAIVUTUSTA VASTAAN



KUVA L1/12 KOMPONENTTEIHIN JAKO, TEHOLLINEN POIKKIPINTA-ALA

$$A_1 = 100\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 125\text{mm}^2$$

$$A_2 = 2 \cdot 22,5\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 56,25\text{mm}^2$$

$$A_3 = 2 \cdot 15,64\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 39,1\text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen painopiste (0-piste kuvassa poikkileikkauksen yläreunassa):

$$y = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3}{A_{\text{kok}}} \\ = \frac{125\text{mm}^2 \cdot 0,625\text{mm} + 56,25\text{mm}^2 \cdot 12,5\text{mm} + 39,1\text{mm}^2 \cdot 24,375\text{mm}}{(125 + 56,25 + 39,1)\text{mm}^2} = 7,87\text{mm}$$

Aksiaalinen jäyhyysmomentti:

$$I_{z,\text{eff}} = I_1 + A_1 \cdot e_1^2 + I_2 + A_2 \cdot e_2^2 + I_3 + A_3 \cdot e_3^2 = 20810\text{mm}^4$$

$$I_1 = \left(\frac{100\text{mm} \cdot (1,25\text{mm})^3}{12} \right) = 16,28\text{mm}^4$$

$$e_1 = 7,87\text{mm} - 0,625\text{mm} = 7,245\text{mm}$$

$$I_2 = 2 \cdot \left(\frac{1,25\text{mm} \cdot (22,5\text{mm})^3}{12} \right) = 2373\text{mm}^4$$

$$e_2 = 12,5\text{mm} - 7,245\text{mm} = 4,63\text{mm}$$

$$I_3 = 2 \cdot \left(\frac{15,64\text{mm} \cdot (1,25\text{mm})^3}{12} \right) = 2,54\text{mm}^4$$

$$e_3 = 24,375 - 7,87\text{mm} = 16,505\text{mm}$$

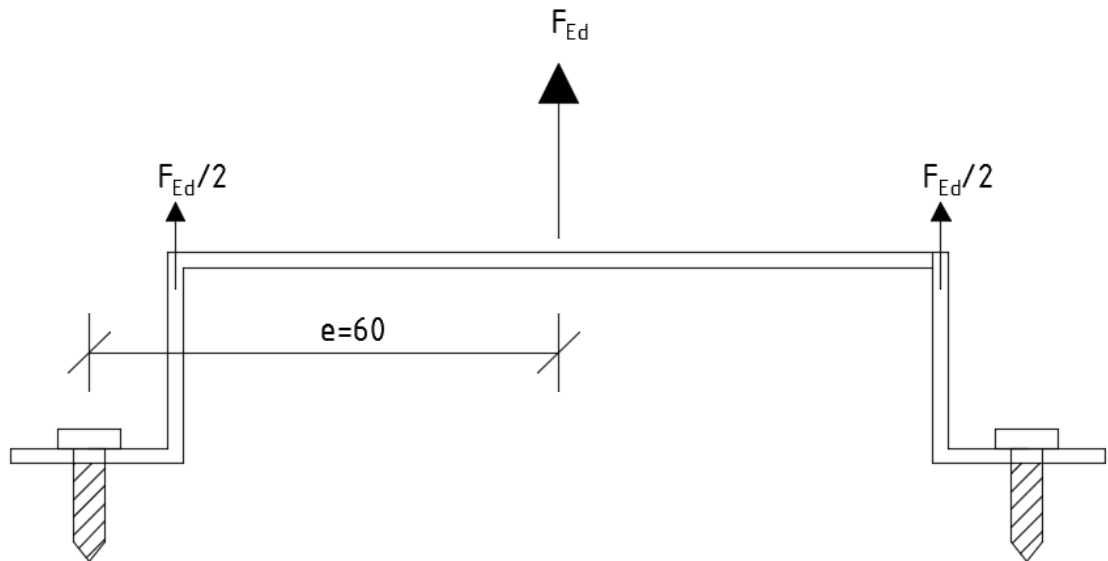
Taivutusvastus:

$$W_{z,\text{eff}} = I / e_{\text{max}} = 20810\text{mm}^2 / (25\text{mm} - 7,87\text{mm}) = 1215\text{mm}^3$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1215\text{mm}^3 \cdot 350\text{N/mm}^2}{1,0} = 425250\text{Nmm} > M_{Ed,\text{max}}, \text{OK!}$$

Laippoihin kohdistuva vääntö:



KUVA L1/13 TUULENIMU JA LIITOKSEN EPÄKESKISYYS

Vääntömomentti:

$$F_{Ed} / 2 = \frac{(q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2)}{2} \cdot e = \frac{1125 \text{ N} / \text{m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m}}{2} = 202,5 \text{ N}$$

Laipan vääntökestävyys:

Murtumismalli 1 (täyden mekanismin syntyminen laipassa):

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 7177,7 \text{ Nmm}}{10 \text{ mm}} = 2871 \text{ N}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \Sigma l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$$= 0,25 \cdot 52,5 \text{ mm} \cdot (1,25 \text{ mm})^2 \cdot 350 \text{ N} / \text{mm}^2 / 1,0 = 7177,7 \text{ Nmm}$$

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot \pi \cdot m = 2 \cdot \pi \cdot 10 \text{ mm} = 62,8 \text{ mm}$$

$$l_{eff,ne} = 4m + 1,25e = 4 \cdot 10 \text{ mm} + 1,25 \cdot 10 \text{ mm} = 52,5 \text{ mm}$$

$$\rightarrow l_{eff,1} = 52,5 \text{ mm}$$

Murtumismalli 2 (ruuvin murtuminen, kun laippa samalla myötää):

$$\begin{aligned}
 F_{T,2,Rd} &= \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \Sigma F_{t,Rd}}{m + n} \\
 &= \frac{2 \cdot 7177,7 \text{ Nmm} + 10 \text{ mm} \cdot 1310 \text{ N}}{10 \text{ mm} + 10 \text{ mm}} = 1372 \text{ N} \\
 M_{pl,2,Rd} &= 0,25 \cdot \Sigma l_{eff,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0} \\
 &= 0,25 \cdot 52,5 \text{ mm} \cdot (1,25 \text{ mm})^2 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 7177,7 \text{ Nmm} \\
 \Sigma F_{t,Rd} &= 1310 \text{ N} \\
 \Sigma l_{eff,2} &= l_{eff,ne} = 4m + 1,25e = 4 \cdot 10 \text{ mm} + 1,25 \cdot 10 \text{ mm} = 52,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Murtumismalli 3 (ruuvin murtuminen):

Ruuvin murtuminen on laskettu kohdassa liitosten mitoitus.

$$\Sigma F_{t,Rd} = 1310 \text{ N (yksi ruuvi)}$$

$$F_{t,Rd} > F_{Ed}, \text{OK!}$$

Leikkaus:

Tuulenimun aiheuttama leikkausvoima:

$$F_{v,Ed} = (q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2) / 2 = (1,125 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m}) / 2 = 0,20 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys:

$$\begin{aligned}
 V_{b,Rd} &= 2 \cdot \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} t \cdot f_{bv}}{\gamma_{M0}} = \frac{23,75 \text{ mm}}{\sin 90^\circ} \frac{1,25 \text{ mm} \cdot 0,58 \cdot 350 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 12688 \text{ N} \\
 \bar{\lambda}_w &= 0,346 \cdot \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 \cdot \frac{25 \text{ mm}}{1,25 \text{ mm}} \sqrt{\frac{350 \text{ N/mm}^2}{211000 \text{ N/mm}^2}} = 0,282 \\
 V_{b,Rd} &> F_{v,Ed}, \text{OK!}
 \end{aligned}$$

Verhouksen oman painon aiheuttama rasitus:

Verhouslevyn oma paino aiheuttaa hattutorrelle vetorasitusta.

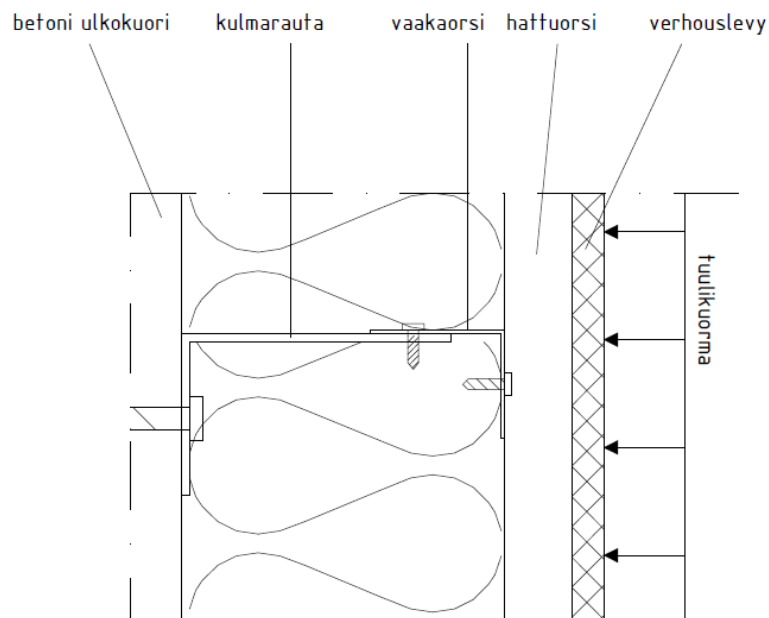
Rasituksen suuruus on:

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 = 1,35 \cdot 150 \text{ N / m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 72,9 \text{ N}$$

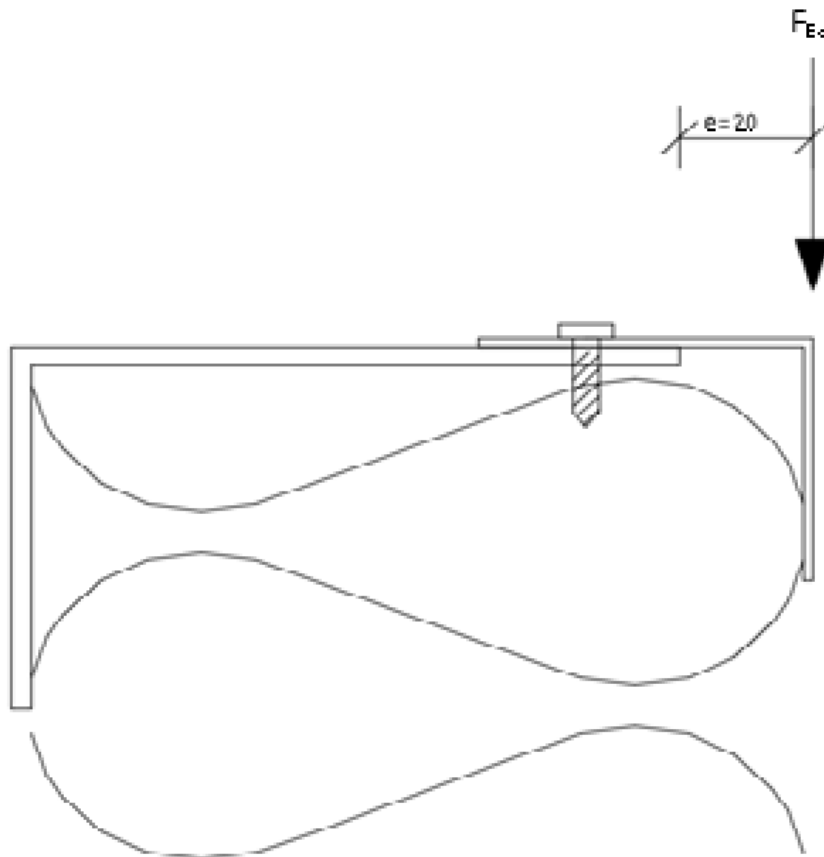
Hattuorren vetokestävyys:

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{231,25 \text{ mm}^2 \cdot 350 \text{ N / mm}^2}{1,0} = 80,9 \text{ kN} > N_{Ed}, \text{ OK!}$$

Vaakaorsi:



KUVA L1/14 DETALJI RAKENTEESTA



KUVA L1/15 VAAKAORTEEN KOHDISTUVA RASITUS JA KUORMAN EPÄKESKISYYS

Vaakaortta rasittaa pystysuunnassa hattutorren ja verhouslevyn omat painot. Myös tuulen imu ja paine aiheuttavat vaakaorrelle rasitusta, mutta ne ovat kantavuuden kannalta pieniä ja rasittavat lähinnä kiinnityskohtia. Esimerkissä vaakaorsi on kulmarautoihin nähden korostetun ulkona (vaakaorrella voidaan tasata seinän epätasaisuudet, jolloin orren pystysuuntainen reuna jää kulmaraudan reunan ulkopuolelle), jotta lasku olisi varman puolella. Jos kulmaraudat asennetaan samaan linjaan kuin hattutorret, ei vaakaorreen kohdistu tuulen aiheuttamaa taivutusrasitusta (tuulikuorma johtuu vaakaorsille hattuarsien kautta).

Pystysuuntainen kuorma:

$$\begin{aligned}
 F_{Ed} &= 1,35 \cdot (s_2 \cdot g_2 + s_1 \cdot s_2 \cdot g_1) \\
 &= 18,6 \text{ N} / \text{m} \cdot 0,6 \text{ m} + 150 \text{ N} / \text{m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 88 \text{ N} \\
 M_{Ed} &= F \cdot e = 88 \text{ N} \cdot 0,02 \text{ m} = 1,76 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Lasketaan W_{eff} niin, että vain kulmaraudan kohdalla vaakaorsi ottaa vääntöä vastaan, jolloin $b = 52 \text{ mm}$. (tällöin lasku reilusti varman puolella)

Jolloin

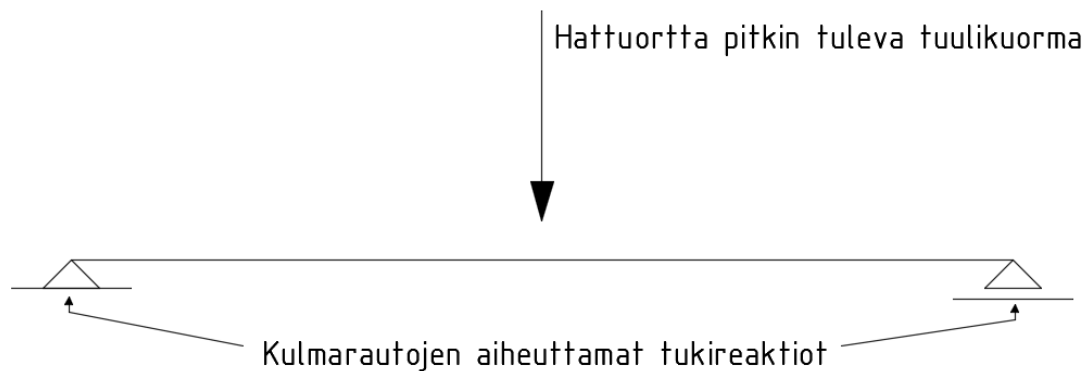
$$W_{eff} = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{52 \text{ mm} \cdot (1,25 \text{ mm})^2}{6} = 13,54 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 13,54 \text{ mm}^3 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 / 1,0$$

$$= 4739 \text{ Nmm} = 4,7 \text{ Nm} > M_{Ed}, \text{ OK!}$$

Kulmarautojen ollessa vaakasuunnassa eri linjassa kuin hattuurret aiheuttaa tuulikuorma vaakaorsiin taivutusrasitusta. Tarkastellaan vaakaorren taivutuskestävyys sekä tuuleni-mua, että tuulenpainetta vastaan. Lasketaan läpi epäedullisin tilanne, missä jänneväli on täydet 600 mm ja kuormitus osuu keskelle aukkoa.

Tuulenpaine:

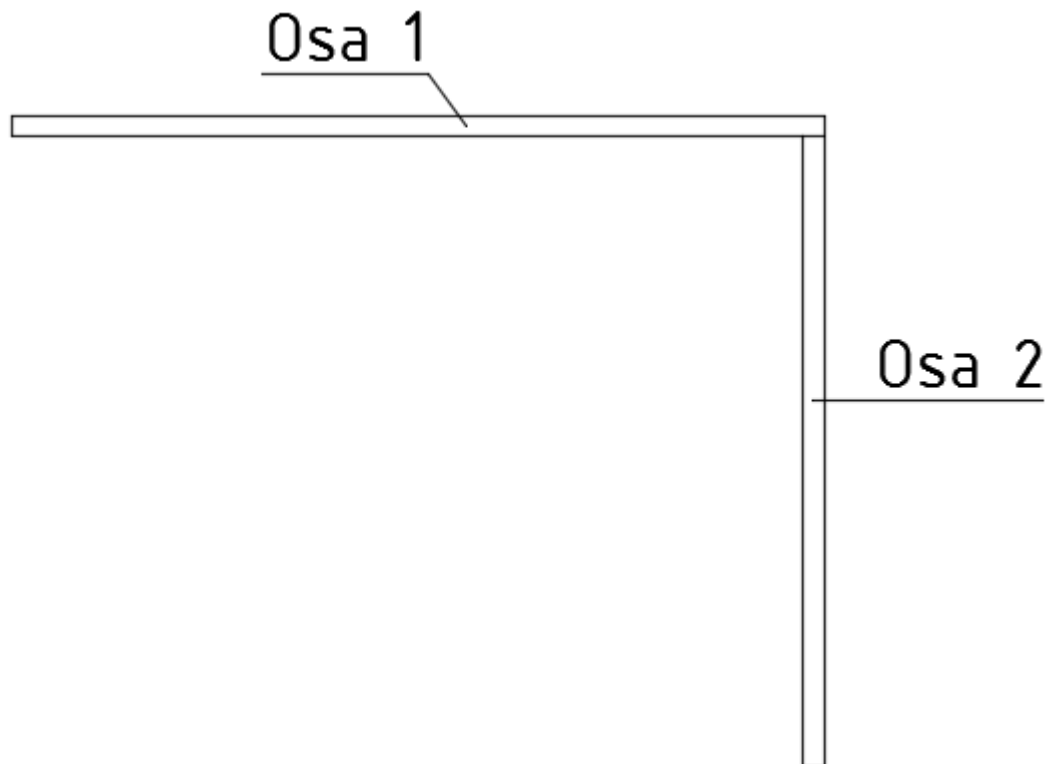


KUVA L1/16 VAAKAORREN YKSINKERTAISTETTU RAKENNEMALLI

$$M_{Ed,max} = \frac{F_{Ed} L}{4} = \frac{309,6 \text{ N} \cdot 600 \text{ mm}}{4} = 46440 \text{ Nmm}$$

$$F_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2 = 0,86 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 0,3096 \text{ kN}$$

Profiilin tehollinen poikkipinta-ala:



KUVA L1/17 VAAKAORREN KOMPONENTTEIHIN JAKO

Profiilin kulmarautaa vasten oleva laippa (osa 1):

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{50/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{6,49}} = 0,675$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = (14,36) / (14,36 - 50) = -0,403$$

(tehollisen poikkileikkauksen painopisteen perusteella)

$$k_\sigma = 1,7 - 5 \cdot (-0,403) + 17,1 \cdot (-0,403)^2 = 6,49$$

$$\bar{\lambda}_p < 0,748$$

->

$$\rho = 1$$

Jolloin $b_{eff} = 1 \cdot 50\text{mm} = 50\text{mm}$

Profiilin hattuorsia vasten oleva laippa (osa 2):

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{40/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{0,43}} = 2,097$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

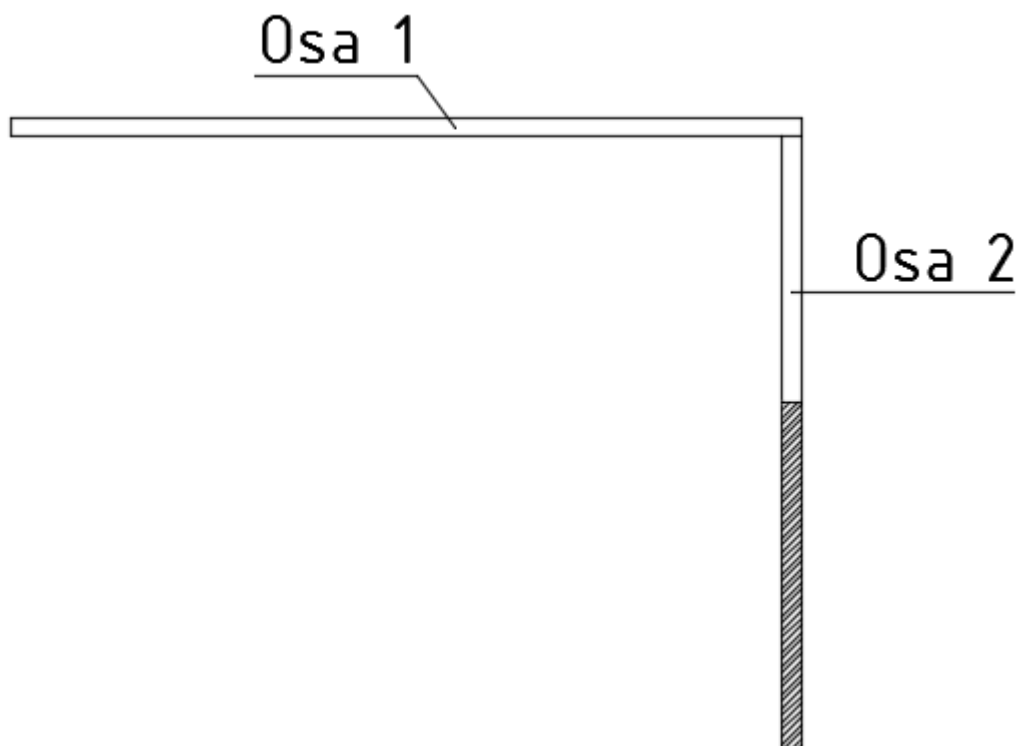
$$k_\sigma = 0,43$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$->$$

$$\rho = \frac{2,097 - 0,188}{2,097^2} = 0,434$$

Jolloin $b_{eff} = 0,434 \cdot 38,75\text{mm} = 16,82\text{mm}$



KUVA L1/18 VAAKAORREN TEHOLLINEN POIKKILEIKKAUS TUULENPAI-
NEEN TAIVUTUSRASITUSTA VASTAAN

Taivutusvastuksen laskeminen:

$$A_1 = 50\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 62,5\text{mm}^2$$

$$A_2 = 16,82\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 21,0\text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen painopiste (0-piste kuvassa L1/17 poikkileikkauksen oikeassa reunassa):

$$y = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{A_{\text{kok}}} \\ = \frac{62,5\text{mm}^2 \cdot 25\text{mm} + 21,0\text{mm}^2 \cdot 0,625\text{mm}}{(62,5 + 21,0)\text{mm}^2} = 18,87\text{mm}$$

Aksiaalinen jäyhyysmomentti:

$$I_{z,\text{eff}} = I_1 + A_1 \cdot e_1^2 + I_2 + A_2 \cdot e_2^2 = 22363\text{mm}^4$$

$$I_1 = \left(\frac{1,25\text{mm} \cdot (50\text{mm})^3}{12} \right) = 13021\text{mm}^4$$

$$e_1 = 25\text{mm} - 18,87\text{mm} = 6,13\text{mm}$$

$$I_2 = \left(\frac{16,82\text{mm} \cdot (1,25\text{mm})^3}{12} \right) = 2,74\text{mm}^4$$

$$e_2 = 18,87\text{mm} - 0,625\text{mm} = 18,245\text{mm}$$

Taivutusvastus:

$$W_{z,\text{eff}} = I / e_{\text{max}} = 22363\text{mm}^2 / (50\text{mm} - 18,87) = 718\text{mm}^3$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{718\text{mm}^3 \cdot 350\text{N/mm}^2}{1,0} = 251300\text{Nmm} > M_{Ed,\text{max}}, \text{OK!}$$

Tuulenimu:

$$M_{Ed,max} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{403,2N \cdot 600mm}{4} = 60480Nmm$$

$$F_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2 = 1,12kN/m^2 \cdot 0,6m \cdot 0,6m = 0,4032kN$$

Profiilin tehollinen poikkipinta-ala:

Profiilin kulmarautaa vasten oleva laippa (osa 1):

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{50/1,25}{28,4 \cdot 0,8194\sqrt{1,522}} = 1,393$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{350}} = 0,8194$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = (-50 + 14,36) / (14,36) = -2,482$$

(tehollisen poikkileikkauksen painopisteen perusteella)

$$k_\sigma = 0,57 - 0,21 \cdot (-2,482) + 0,07(-2,482)^2 = 1,522$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,748$$

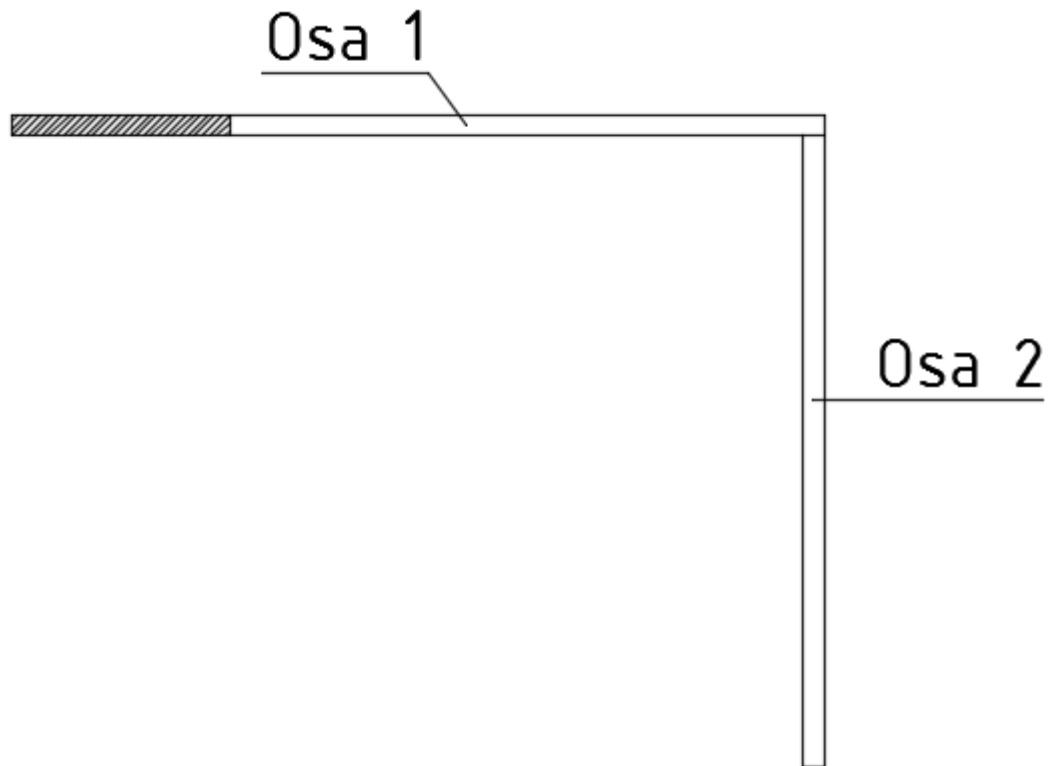
->

$$\rho = \frac{1,393 - 0,188}{1,393^2} = 0,621$$

$$\text{Jolloin } b_{eff} = 0,621 \cdot (50 - 14,36)mm = 22,13mm$$

Profiilin hattuorsia vasten oleva laippa (osa 2) voidaan hyödyntää laskennassa kokonaan, koska se on vedetyllä puolella

$$\text{Jolloin } b_{eff} = 1 \cdot 40mm = 40mm$$



KUVA L1/19 VAAKAORREN TEHOLLINEN POIKKILEIKKAUS TUULENIMUN
TAIVUTUSRASITUSTA VASTAAN

Taivutusvastuksen laskeminen:

$$A_1 = (22,13\text{mm} + 14,36\text{mm}) \cdot 1,25\text{mm} = 45,61\text{mm}^2$$

$$A_2 = 38,75\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} = 48,44\text{mm}^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen painopiste (0-piste kuvassa L1/18 poikkileikkauksen oikeassa reunassa):

$$y = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{A_{\text{kok}}}$$

$$= \frac{45,61\text{mm}^2 \cdot 18,25\text{mm} + 48,44\text{mm}^2 \cdot 0,625\text{mm}}{(45,61 + 48,44)\text{mm}^2} = 9,17\text{mm}$$

Aksiaalinen jäyhyysmomentti:

$$I_{z,eff} = I_1 + A_1 \cdot e_1^2 + I_2 + A_2 \cdot e_2^2 = 12365 \text{mm}^4$$

$$I_1 = \left(\frac{1,25 \text{mm} \cdot (36,49 \text{mm})^3}{12} \right) = 5061 \text{mm}^4$$

$$e_1 = 18,25 \text{mm} - 9,17 \text{mm} = 9,08 \text{mm}$$

$$I_2 = \left(\frac{38,75 \text{mm} \cdot (1,25 \text{mm})^3}{12} \right) = 6,31 \text{mm}^4$$

$$e_2 = 9,17 \text{mm} - 0,625 \text{mm} = 8,545 \text{mm}$$

Taivutusvastus:

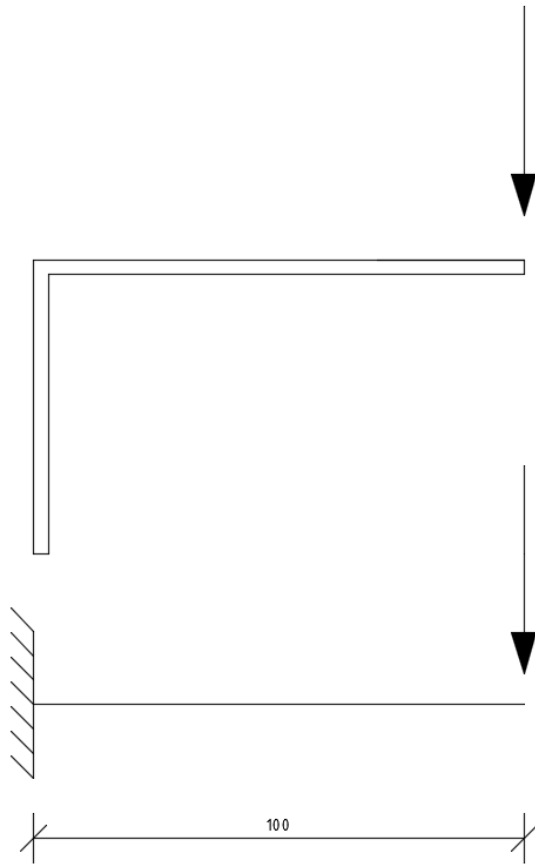
$$W_{z,eff} = I / e_{\max} = 12365 \text{mm}^2 / (50 - 9,17 \text{mm}) = 302,8 \text{mm}^3$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{302,8 \text{mm}^3 \cdot 350 \text{N/mm}^2}{1,0} = 105980 \text{Nmm} > M_{Ed,max}, \text{OK!}$$

Kulmarauta:

Kulmaraudalle kriittiset rasitukset ovat orsien, eristyksen ja levytyksen paino, sekä tuulen imu. Yksinkertaistetaan kuormituksen muodostamista siten, että kaikki pystysuuntainen kuormitus kohdistuu kulmaraudan päähän, jolloin ollaan laskennassa varmallalla puolella. Ajatellaan kulmaraudan rakennemalli sellaiseksi, että se on toisesta päästä jäykästi sidottu uloke.



KUVA L1/20 KULMARAUTAAN KOHDISTUVA PYSTYSUUNTAINEN KUORMITUS

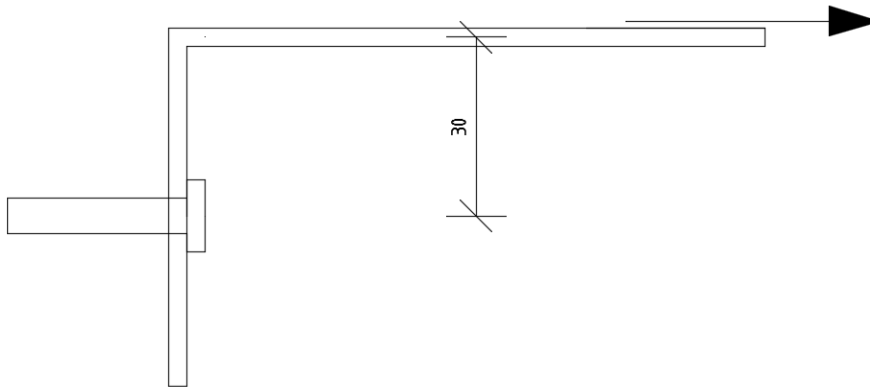
Pystysuuntainen kuormitus:

$$\begin{aligned}
 F_{Ed} &= 1,35 \cdot (g_1 \cdot s_2 \cdot s_3 + g_2 \cdot s_2 + g_3 \cdot s_3 + g_4 \cdot s_2 \cdot s_3) \\
 &= 1,35(150N / m^2 \cdot 0,6m \cdot 0,6m + 18,6N / m \cdot 0,6m + 8,83N / m \cdot 0,6m \\
 &\quad + 100N / m^2 \cdot 0,6m \cdot 0,6m) \\
 &= 143,7N \\
 M_{Ed} &= F_{Ed} \cdot e = 143,7N \cdot 0,1m = 14,37Nm
 \end{aligned}$$

Kulmaraudan taivutuskestävyys:

$$\begin{aligned}
 W_{Eff} &= \frac{52mm \cdot (3mm)^2}{6} = 78mm^3 \\
 M_{Rd} &= W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 78mm^3 \cdot 350N / mm^2 / 1,0 = 27,3Nm > M_{Ed}, OK!
 \end{aligned}$$

Tuulenimun aiheuttama rasitus:



KUVA L1/21 TUULENIMUN AIHEUTTAMA RASITUS KULMARAUDALLE

Tuulenimun aiheuttama rasitus:

$$F_{Ed} = s_2 \cdot s_3 \cdot q_{w,d} = 0,6m \cdot 0,6m \cdot 1,12kN/m^2 = 0,40kN$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot e = 400N \cdot 0,03m = 12Nm$$

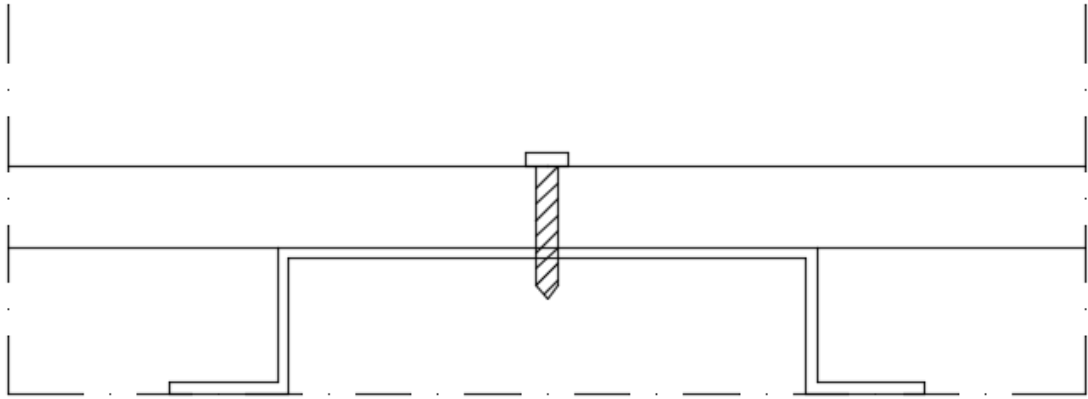
Kulmaraudan taivutuskestävyys:

$$W_{Eff} = \frac{52mm \cdot (3mm)^2}{6} = 78mm^3$$

$$M_{Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 78mm^3 \cdot 350N/mm^2 / 1,0 = 27,3Nm > M_{Ed}, OK!$$

Liitosten mitoitus:

Verhouslevyn kiinnitys hattuorreen



KUVA L1/22 VERHOUSLEVYN KIINNITYS HATTUORTEEN

Verhouslevy: kuitusementtilevy (esim. Cembrit)

- paksuus 12 mm
- ruuvien keskiöväli 400 mm (reunaetäisyydet ≥ 30 mm)
- ruuvit: poraruuvi 4.8x25 esim. Würth Piasta

Leikkaus:

Reunapuristuskestävyys:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

$$= 2,1 \cdot 420 \text{ N/mm}^2 \cdot 4,8 \text{ mm} \cdot 1,25 \text{ mm} / 1,25 = 4,2 \text{ kN}$$

Nettopoikkileikkauksen kestävyys: ei tule tässä tapauksessa kyseeseen

Leikkauskestävyys: $F_{v,Rd} = 6,1$ kN (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{b,Rd}$ ja $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$, OK!

Leikkausvoima / ruuvi:

Kuormat:

- verhouslevyn oma paino $g = 150$ N/m²

$$V_{Ed} = 1,35 \cdot g \cdot s_1 \cdot s_2 = 1,35 \cdot 150 \text{ N/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} = 48,6 \text{ N} < F_{Rd}, \text{ OK!}$$

Veto:

Läpivetokestävyys: ei lasketa, ruuvien asennusväli verhoulevyn valmistajan ohjeiden mukaan

Ulosvetokestävyys:

$$F_{o,Rd} = 0,65 \cdot d \cdot t_{\text{sup}} \cdot f_{u,\text{sup}} / \gamma_{M2}$$

$$= 0,65 \cdot 4,8\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} \cdot 420\text{N/mm}^2 / 1,25 = 1310\text{N}$$

Vetokestävyys: $F_{t,Rd} = 9,5\text{kN}$ (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{t,Rd} \geq F_{pr,Rd}$ ja $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$, OK!

Vetoa / ruuvi:

Kuormat:

- maksimi tuulenimu $q_{w,d} = 1,12 \text{ kN/m}^2$

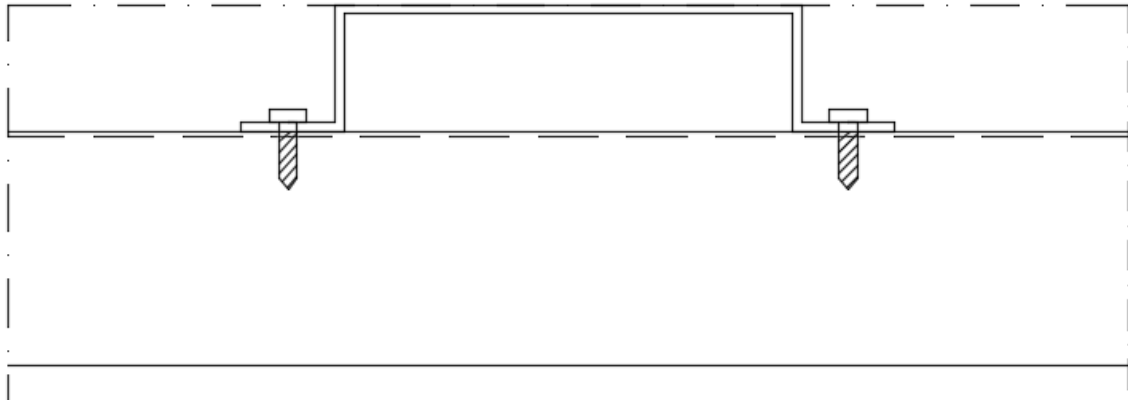
$$F_{t,Ed} = q_{w,d} \cdot s_1 \cdot k_1 = 1120\text{N/m}^2 \cdot 0,6\text{m} \cdot 0,4\text{m} = 268,8\text{N} < F_{t,Rd}, \text{OK!}$$

Yhdistetyn leikkauksen ja vedon tapauksessa liitoksen kestävyys tulee täyttää ehto:

$$F_{t,Ed} / F_{t,Rd} + F_{v,Ed} / F_{v,Rd} \leq 1$$

$$48,6\text{N} / 4200\text{N} + 268,8\text{N} / 1310\text{N} = 21,7\% < 1, \text{OK!}$$

Hattuorren kiinnitys vaakaorren



KUVA L1/23 HATTUORREN KIINNITYS VAAKAORTEEN

- ruuvit: poraruuvi 4.8x19 esim Würth Piasta
- 2 ruuvia / risteyskohta (kuten kuvassa L1/23)

Leikkaus:

Reunapuristuskestävyys:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

$$= 1,63 \cdot 420 \text{ N/mm}^2 \cdot 4,8 \text{ mm} \cdot 1,25 \text{ mm} / 1,25 = 3,29 \text{ kN}$$

$$\alpha = 3,2 \sqrt{t/d} = 3,2 \sqrt{1,25/4,8} = 1,63$$

Nettopoikkileikkauksen kestävyys: ei tule tässä tapauksessa kyseeseen

Leikkauskestävyys: $F_{v,Rd} = 6,1 \text{ kN}$ (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{b,Rd}$ ja $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$, OK!

Leikkausvoima / ruuvi:

Kuormat:

- verhoulevyn oma paino $g_1 = 150 \text{ N/m}^2$
- hattuorren oma paino $g_2 = 18,6 \text{ N/m}$

$$V_{Ed} = (1,35 \cdot (g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + g_2 \cdot s_1)) / 2$$

$$= (1,35 \cdot (150 \text{ N/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} + 18,6 \text{ N/m} \cdot 0,6 \text{ m})) / 2 = 44 \text{ N} < F_{Rd}, \text{OK!}$$

Veto:

Läpivetokestävyys:

$$F_{pr.Rd} = 0,5 \cdot d_w \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} = 0,5 \cdot 8\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} \cdot 420\text{N/mm}^2 / 1,25 = 1680\text{N}$$

Ulosvetokestävyys:

$$F_{o.Rd} = 0,65 \cdot d \cdot t_{\text{sup}} \cdot f_{u,\text{sup}} / \gamma_{M2}$$

$$= 0,65 \cdot 4,8\text{mm} \cdot 1,25\text{mm} \cdot 420\text{N/mm}^2 / 1,25 = 1310\text{N}$$

Vetokestävyys: $F_{t.Rd} = 9,5\text{kN}$ (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{t.Rd} \geq F_{pr.Rd}$ ja $F_{t.Rd} \geq F_{o.Rd}$, OK!

Vetoa / ruuvi:

Kuormat:

- maksimi tuulenimu $q_{w,d} = 1,12 \text{ kN/m}^2$

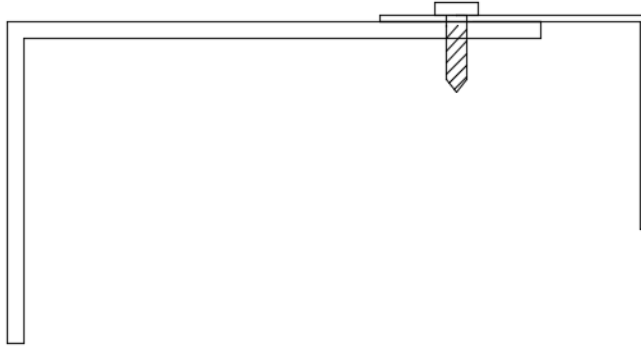
$$F_{t,Ed} = (q_{w,d} \cdot s_1 \cdot s_2) / 2 = (1120\text{N/m}^2 \cdot 0,6\text{m} \cdot 0,6\text{m}) / 2 = 201,6\text{N} < F_{t,Rd}, \text{OK!}$$

Yhdistetyn leikkauksen ja vedon tapauksessa liitoksen kestävyys tulee täyttää ehto:

$$F_{t,Ed} / F_{t,Rd} + F_{v,Ed} / F_{v,Rd} \leq 1$$

$$44\text{N} / 3290\text{N} + 201,6\text{N} / 1310\text{N} = 16,7\% < 1, \text{OK!}$$

Vaakaorren kiinnitys kulmarautaan



KUVA L1/24 VAAKAORREN JA KULMARAUDAN VÄLINEN LIITOS

- ruuvit: poraruuvi 4.8x19 esim. Würth Piasta
- 1 ruuvi / kulmarauta

Leikkaus:

Reunapuristuskestävyys:

$$F_{b,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$$

$$= 2,087 \cdot 420 \text{ N/mm}^2 \cdot 4,8 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} / 1,25 = 10,1 \text{ kN}$$

$$\alpha = 2,087$$

(α laskettu lineaarisesti interpoloimalla)

Nettopoikkileikkauksen kestävyys:

$$F_{n,Rd} = A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

$$= (52 \text{ mm} - 4,8 \text{ mm}) \cdot 3 \text{ mm} \cdot 420 \text{ N/mm}^2 / 1,25 = 47,6 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys: $F_{v,Rd} = 6,1 \text{ kN}$ (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{b,Rd}$ ja $F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$

Väärin $\rightarrow F_{b,Rd} = F_{n,Rd} = F_{v,Rd} / 1,2 = 5,1 \text{ kN}$

Leikkausvoima / ruuvi:

Kuormat:

- maksimi tuulenimu $q_{w,d} = 1,12 \text{ kN/m}^2$

$$V_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_2 \cdot s_3 = 1,12 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 0,40 \text{ kN} < F_{Rd}, \text{ OK!}$$

Veto:

Läpivetokestävyys:

$$F_{pr,Rd} = 0,5 \cdot d_w \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} = 0,5 \cdot 8 \text{ mm} \cdot 1,25 \text{ mm} \cdot 420 \text{ N/mm}^2 / 1,25 = 1680 \text{ N}$$

Ulosvetokestävyys:

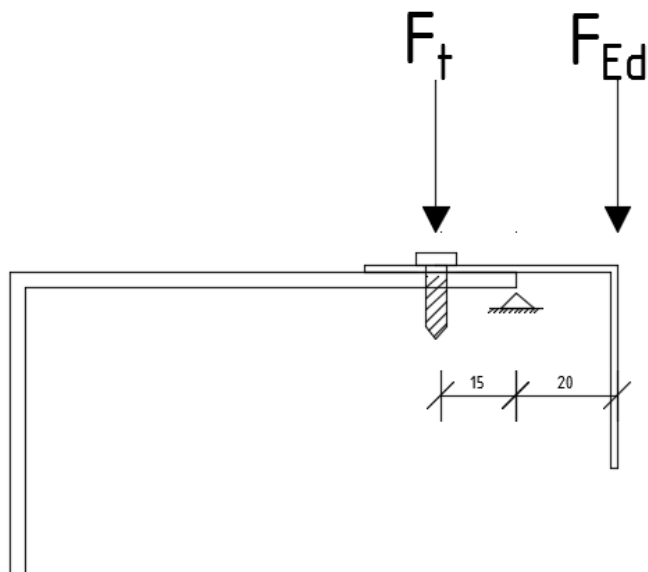
$$\begin{aligned} F_{o,Rd} &= 0,65 \cdot d \cdot t_{\text{sup}} \cdot f_{u,\text{sup}} / \gamma_{M2} \\ &= 0,65 \cdot 4,8 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 420 \text{ N/mm}^2 / 1,25 = 3145 \text{ N} \end{aligned}$$

Vetokestävyys: $F_{t,Rd} = 9,5 \text{ kN}$ (valmistajan arvo)

Ehto: $F_{t,Rd} \geq F_{pr,Rd}$ ja $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$, OK!

Vetoa / ruuvi:

Vetoa ruuville aiheuttaa liitoksessa syntyvä momentti: Ajatellaan vaakaorren tukipisteen olevan kulmaraudan päässä, jolloin vaakaorren kannattama paino pyrkii nostamaan orren seinää lähimpänä olevan osan ylös. Tällöin liitoksessa olevaan ruuviin kohdistuu vetoa



KUVA L1/25 LIITOKSESSA VAIKUTTAVAT VOIMAT

Kuormat:

- verhouslevyn oma paino $g_1 = 150 \text{ N/m}^2$
- Hattuorren oma paino $g_2 = 18,6 \text{ N/m}$

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot (g_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + g_2 \cdot s_2)$$

$$= 1,35 \cdot (150 \text{ N/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} + 18,6 \text{ N/m} \cdot 0,6 \text{ m}) = 88 \text{ N}$$

Jolloin liitoksen momenttitasapainon perusteella:

$$F_t \cdot 15 \text{ mm} = F_{Ed} \cdot 20 \text{ mm}$$

$$F_t = (F_{Ed} \cdot 20 \text{ mm}) / 15 \text{ mm} = (88 \text{ N} \cdot 20 \text{ mm}) / 15 \text{ mm} = 117 \text{ N} < F_{Rd}, \text{ OK!}$$

Yhdistetyn leikkauksen ja vedon tapauksessa liitoksen kestävyys tulee täyttää ehto:

$$F_{t,Ed} / F_{t,Rd} + F_{v,Ed} / F_{v,Rd} \leq 1$$

$$44 \text{ N} / 3290 \text{ N} + 201,6 \text{ N} / 1310 \text{ N} = 16,7\% < 1, \text{ OK!}$$

Kulmaraudan ankkurointi betoni ulkokuoreen:

Kulmarauta ankkuroidaan betoni ulkokuoreen. Ankkurin tulee kestää tuulenimun aiheuttama veto sekä rakenteiden omasta painosta aiheutuva leikkaus. Leikkausmitoitus tehdään valmistajan ohjeiden mukaan (leikkauskestävyydelle luultavasti valmis arvo).

Kuormat:

$$- \text{maksimi tuulenimu } q_{w,d} = 1,12 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{Ed} = q_{w,d} \cdot s_2 \cdot s_3 = 1,5 \cdot 1,12 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} = 0,40 \text{ kN}$$

Ankkureiden koeistuksen tulokset (veto murtoon asti):

TAULUKKO L1/1 KULMARAUTOJEN ANKKUREIDEN VETOTULOKSET

Vetotulokset	5	kpl
1.	3	kN
2.	3,2	kN
3.	2,5	kN
4.	2,7	kN
5.	3,1	kN

$$m_x = (3 + 3,2 + 2,5 + 2,7 + 3,1) \text{ kN} / 5 = 2,90 \text{ kN}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - m_x)^2}{n-1}} = 0,2915$$

$$V_x = \frac{s}{m_x} = \frac{0,2915}{2,90} = 0,1005$$

$$k_{d,n} = 3,37$$

$$\eta_d = 0,567$$

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x) = 0,567 \cdot 2,90 \text{ kN} (1 - 3,37 \cdot 0,1005) = 1,087 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} > F_{Ed}, \text{ OK!}$$

Vanhan rakenteen ankkurointi:

Ankkuroidaan sandwichelementin ulkokuori sisäkuoreen ulkokuoren lisääntyneen kuormituksen takia. Jokaiseen elementtiin asennetaan kaksi ankkuria kohtisuoraan, jonka lisäksi ankkureita asennetaan 45 °:n kulmassa. 45 °:n kulmassa oleville ankkureille lasketaan kaikki kuormat. Koska kuormaa vastaanottavat ankkurit ovat 45 °:n kulmassa, voidaan pystysuuntaiset sekä vaakasuuntaiset kuormat laskea yhteen. Tämä johtuu siitä, että ankkurin pysty- ja vaakasuuntaiset vektorit ovat yhtä suuria. Ankkureiden kantavuuden kannalta merkittävät kuormat ovat rakenteiden omat painot, sekä tuulen imukuorma.

Kuormat:

- tuulen imukuorma $q_{w,k} = 0,75 \text{ kN/m}^2$
- ulkokuoren oma paino $g_{k,\text{ulkokuori}} = 1,5 \text{ kN/m}^2$
- Lisäverhouksen paino $g_{k,\text{lisäverhous}} = 0,30 \text{ kN/m}^2$
-

$$F_{Ed} = 1,5 \cdot q_{w,k} + 1,35(g_{k,\text{ulkokuori}} + g_{k,\text{lisäverhous}})$$

$$= 1,5 \cdot 0,75 \text{ kN/m}^2 + 1,35(1,5 \text{ kN/m}^2 + 0,30 \text{ kN/m}^2) = 3,2 \text{ kN/m}^2$$

Ankkureiden koeistuksen tulokset (veto murtoon asti):

TAULUKKO L1/2 ULKOKUOREN ANKKUREIDEN VETOTULOKSET

Vetotulokset	7	kpl
1.	9	kN
2.	9,8	kN
3.	11	kN
4.	8,8	kN
5.	9	kN
6.	9,5	kN
7.	8,6	kN

$$m_x = (9 + 9,8 + 11 + 8,8 + 9 + 9,5 + 8,6)kN / 7 = 9,39kN$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - m_x)^2}{n-1}} = 0,821$$

$$V_x = \frac{s}{m_x} = \frac{0,821}{9,39} = 0,087$$

$$k_{d,n} = 3,31$$

$$\eta_d = 0,567$$

$$F_{Rd} = \eta_d \cdot m_x (1 - k_{d,n} \cdot V_x) = 0,567 \cdot 9,39kN (1 - 3,31 \cdot 0,087) \\ = 3,79kN$$

mu-
Ankkureita 45°:n kulmassa (pysty- ja vaakasuuntainen komponentti trigonometrian
kaisesti $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -kertainen päävektoriin nähden):

$$\frac{3,2kN / m^2}{3,79kN \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}} = 1,194kpl/m^2$$

Esimerkiksi elementtiin, jonka mitat ovat 2,3m x 2,8m (ei aukkoja) tulee:

$$A = 2,3m \cdot 2,8m = 6,44m^2 \\ 6,44m^2 \cdot 1,194kpl / m^2 = 7,69kpl$$

→8 45°:n kulmassa olevaa ankkuria

Liite 2. Esimerkkituloste Excel-pohjasta

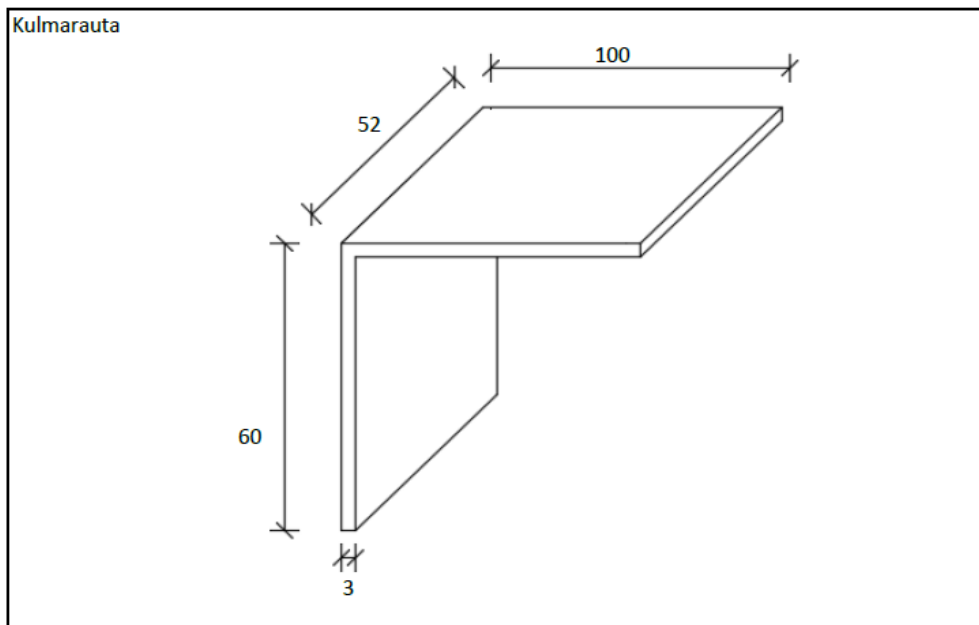
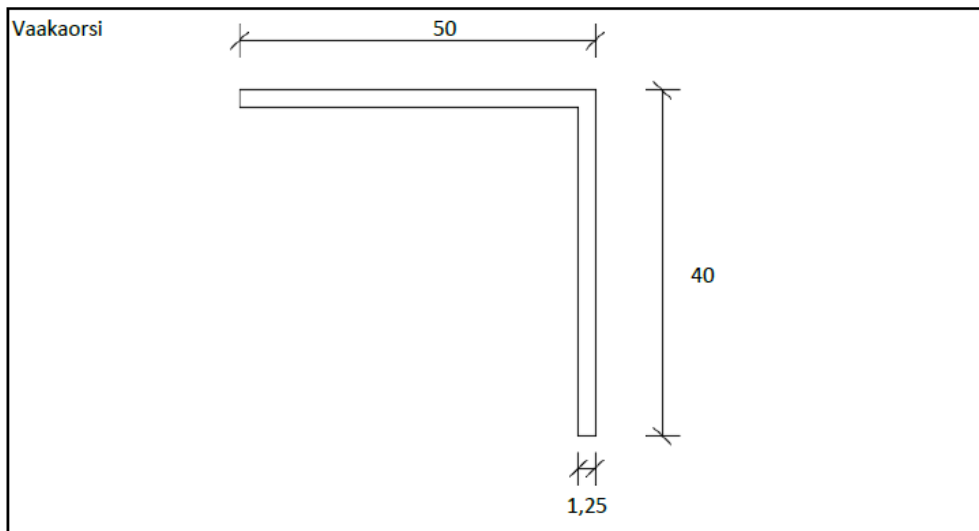
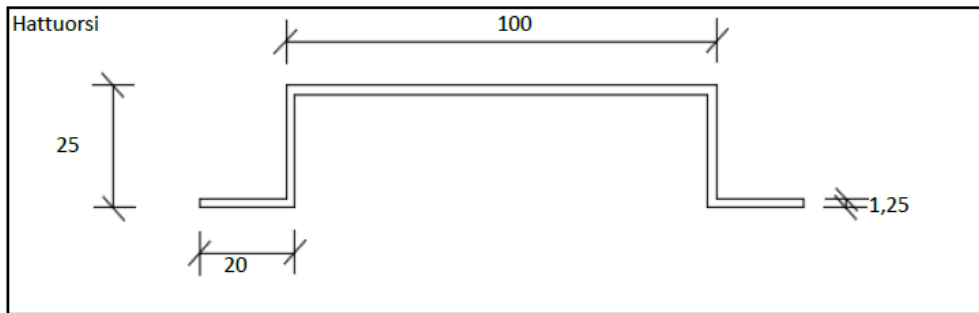
KOHDE	Esimerkki
Osoite:	Esimerkkikatu 16, 00000 Kaupunki
Tilaaaja:	As Oy Esimerkki

	Numeroarvo	Yksikkö
Rakennuksen korkeus	18	m
Rakennuksen leveys	32	m
Rakennuksen syvyys	16	m
Maksimi tuulenpaine	572	N/m^2
Maksimi tuulenimu nurkka-alueilla	748	N/m^2
Maksimi tuulenimu keskialueilla	616	N/m^2
Sisäkuoren paksuus	150	mm
Eristeen paksuus	60	mm
Ulkokuoren paksuus	60	mm
Lisälämmöneristeen paksuus	100	mm
Lisälämmöneristeen paino	100	N/m^2
Verhouslevy paksuus	12	mm
paino	150	N/m^2
Hattuorsi		
k-jako	600	mm
paino	18,6	N/m
paksuus	1,25	mm
mitta 1	20	mm
mitta 2	25	mm
mitta 3	100	mm
fy	350	N/mm^2
fu	420	N/mm^2
Vaakaorsi		
k-jako	600	mm
paino	8,83	N/m
paksuus	1,25	mm
mitta 1	40	mm
mitta 2	50	mm
fy	350	N/mm^2
fu	420	N/mm^2
Kulmarauta		
k-jako (vaakasuunnassa)	600	mm
k-jako (pystysuunnassa)	600	mm
paksuus	3	mm
mitta 1	60	mm
mitta2	100	mm

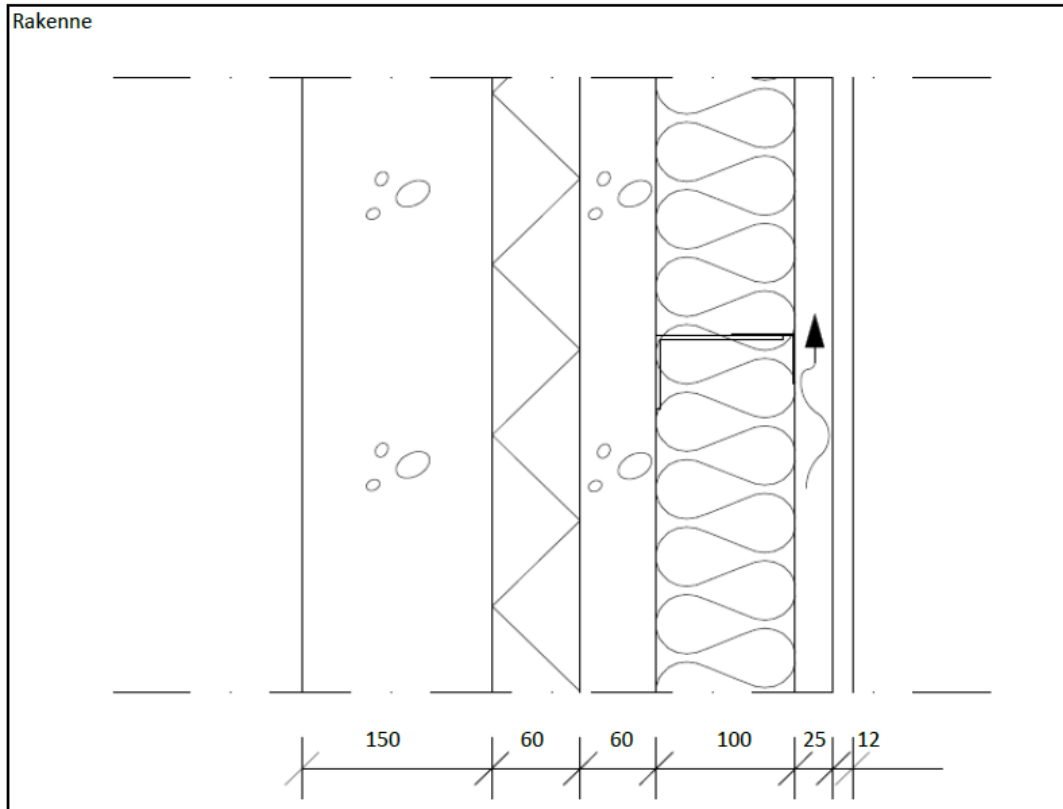
Tuulikuorman laskeminen	
q_k [N/m^2]	440

mitta 3	52	mm
Ruuvi 1		
k-jako	400	mm
d	4,8	mm
dw	8	mm
pituus	25	mm
Fv.Rd	6100	N
Ft.Rd	9500	N
Ruuvi 2		
ruuveja / risteyskohta	2	kpl
d	4,8	mm
dw	8	mm
pituus	19	mm
Fv.Rd	6100	N
Ft.Rd	9500	N
Ruuvi 3		
ruuveja / liitos	1	kpl
d	4,8	mm
dw	8	mm
pituus	19	mm
Fv.Rd	6100	N
Ft.Rd	9500	N
Kulmarautojen ja vaakaorsien välinen liitos		
e ₁	15	mm
e ₂	20	mm

*Ruuvijako levyvalmistajan
ohjeiden mukaan*



Rakenne



Liitosten mitoitus

Verhouslevyn ja hattutorren välinen liitos		
Liitoksen kestävyys		
Reunapuristuskestävyys	4233,6	N
Leikkauskestävyys	6100	N
Ulosvetokestävyys	1310,4	N
Vetokestävyys	9500,00	N
Kestävyys leikkauskuormaa vastaan		
Leikkauskuorma/ruuvi	48,60	N
Käyttöaste	1 %	
Kestävyys vetoa vastaan		
Vetoa / ruuvi	269,28	N
Käyttöaste	21 %	N
Käyttöaste yhdistettyä leikkausta ja vetoa vastaan	22 %	
Hattutorren ja vaakaorren välinen liitos		
Liitoksen kestävyys		
Reunapuristuskestävyys	3292,1	N
Leikkauskestävyys	6100,00	N
Läpivetokestävyys	1680	N
Ulosvetokestävyys	1310,40	N
Vetokestävyys	9500,00	N
Kestävyys leikkauskuormaa vastaan		
Leikkauskuorma/ruuvi	43,983	N
Käyttöaste	1 %	
Kestävyys vetoa vastaan		
Vetoa / ruuvi	201,96	N
Käyttöaste	15 %	N
Käyttöaste yhdistettyä leikkausta ja vetoa vastaan	17 %	
Vaakaorren ja kulmaraudan välinen liitos		
Liitoksen kestävyys		
Reunapuristuskestävyys	5083,3	N

Nettopoikkileikkauksen kestävyys	5083,3	N
Ulosvetokestävyys	3144,96	N
Vetokestävyys	9500,00	N
Kestävyys leikkauskuormaa vastaan	5083,3	N
Leikkauskuorma/ruuvi	269,28	N
Käyttöaste	5 %	
Kestävyys vetoa vastaan	3144,96	N
Vetoa / ruuvi	117,288	N
Käyttöaste	4 %	N
Käyttöaste yhdistettyä leikkausta ja vetoa vastaan	9 %	

Orsien mitoitus

Hattuorsi		
Tuulenpaineen aiheuttama puristus N_{Ed}	514,8	N/m
Tuulenpaineen aiheuttama taivutusmomentti $M_{Ed,max}$	23166	Nmm
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	1357	mm ³
Taivutuskestävyys M_{Rd}	474817	Nmm
Käyttöaste	4,88 %	
Taipuma f (KRT)	0,15	mm
Taipumaraja	4	mm
Käyttöaste	3,8 %	
Tuulenimu N_{Ed}	673,2	N/m
Tuulenimun aiheuttama taivutusmomentti $M_{Ed,max}$	30294	Nmm
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	1216	mm ³
Taivutuskestävyys M_{Rd}	425540	Nmm
Käyttöaste	7,12 %	
Laipan vääntöä aiheuttava uumassa vaikuttava voima (tuulenimusta) $F_{t,Ed}$	201,96	N
Laipan kestävyys $F_{t,Rd}$	1310,40	N
Käyttöaste	15,41 %	
Verhouslevyn painosta aiheutuva vetorasitus / liitoskohta $N_{t,Ed}$	73	N
Hattuorren vetokestävyys $N_{t,Rd}$	80938	N
Käyttöaste	0,09 %	
Tuulenimun aiheuttama leikkaus $F_{v,Ed}$	202	N

Leikkauskestävyys $V_{b,Rd}$	12687,5	<i>N</i>
Käyttöaste	1,59 %	
Vaakaorsi		
Rakenteiden omat painot / liitoskohta F	87,966	<i>N</i>
Oman painon aiheuttama vääntömomentti M_{Ed}	1759	<i>Nmm</i>
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	13,54	<i>mm³</i>
Taivutuskestävyys $M_{c,Rd}$	4740	<i>Nmm</i>
Käyttöaste	37,12 %	
Tuulenpaineen aiheuttama taivutusmomentti $M_{Ed,max}$	46332	<i>Nmm</i>
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	718,5	<i>mm³</i>
Taivutuskestävyys M_{Rd}	251479	<i>Nmm</i>
Käyttöaste	18,42 %	
Tuulenimun aiheuttama taivutusmomentti $M_{Ed,max}$	60588	<i>Nmm</i>
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	302,8	<i>mm³</i>
Taivutuskestävyys M_{Rd}	105966	<i>Nmm</i>
Käyttöaste	57,18 %	
Kulmarauta		
Oman painon aiheuttama pystysuuntainen kuorma F_d	143,7	<i>N</i>
Pystykuormasta aiheutuva momentti kulmaraudan taitoskohdassa M_{Ed}	14372	<i>Nmm</i>
Tehollinen taivutusvastus W_{eff}	78	<i>mm³</i>
Taivutuskestävyys M_{Rd}	27300	
Käyttöaste	52,64 %	
Tuulenimun aiheuttama vaakakuorma F_d	403,92	<i>N</i>
Vaakakuormasta aiheutuva momentti kulmaraudan ankkurointikohdalla M_{Ed}	12117,6	<i>Nmm</i>
Taivutuskestävyys M_{Rd}	27300	<i>Nmm</i>
Käyttöaste	44,39 %	

Julkisivuelementtien ankkurointi

Kuormat		
Tuulen imukuorma	q_k	0,75 kN/m ²
Ulkokuoren paino	g_{k1}	1,5 kN/m ²
Lisäverhouksen paino	g_{k2}	0,30 kN/m ²
Kuormat yhteensä		2,54 kN/m ²
f_d		3,187 kN/m ²

Ankkurit Hilti 45° kulmassa

Vetotulokset		
	7	kpl
1.	9	kN
2.	9,8	kN
3.	11	kN
4.	8,8	kN
5.	9	kN
6.	9,5	kN
7.	8,6	kN
8.		kN
9.		kN
10.		kN

SFS-EN 1990 Liite D:

$$F_d = \eta_d m_x \{1 - k_{d,n} V_x\}$$

$$V_x = \frac{s}{m_x}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Missä

 F_d = ankkurin mitoituskestävyys η_d = kokonaisvarmuuskerroin m_x = kokeiden keskiarvotulos $k_{d,n}$ = kerroin, ks. taulukko V_x = Kokeiden variaatiokerroinTaulukko Kertoimen $k_{d,n}$ arvot murtorajatilan mitoitusarvoa varten

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x tunnettu	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04

m_x	9,3857 koetulosten keskiarvo (kN)
n	7 koetulosten lukumäärä
$k_{d,n}$	3,31 kerroin
n_d	0,567 kokonaisvarmuuskerroin materiaalille
s	0,82144 keskihajonta
V_x	0,0875 variaatiokerroin
F_d	3,78 ankkurin mitoituskestävyys (kN)
Ankkureita 45° kulmassa	1,19 kpl/m ²
Ankkureita 90° kulmassa	2 kpl/elementti

Elementtien mitat	B(m)	H(m)	A(m ²)	Ikkuna A	A_{kok}	45°:n ankkureita (kpl/elementti)	Huom!
Elementti 1	2,3	2,8	6,44	0	6,44	8	
Elementti 2							
Elementti 3							
Elementti 4							
Elementti 5							
Elementti 6							
Elementti 7							
Elementti 8							
Elementti 9							

Kulmarautojen ankkurointi

Kuormat		
Tuulen imukuorma/ankkuri	$q_{w,d}$	0,40 kN
Rakenteiden omat painot / ankkuri	G_d	0,14 kN

Ankkurit **Hilti** 90° kulmassa

Vetotulokset		
	5	kpl
1.	3	kN
2.	3,2	kN
3.	2,5	kN
4.	2,7	kN
5.	3,1	kN
6.		kN
7.		kN
8.		kN
9.		kN
10.		kN

m_x	2,90	koetulosten keskiarvo (kN)
n	5	koetulosten lukumäärä
s	0,29155	keskihajonta
V_x	0,10053	variaatiokerroin
$k_{d,n}$	3,37	
n_d	0,567	kokonaisvarmuuskerroin materiaalille
F_d	1,08721	ankkurin mitoituskestävyys (kN)
Käyttöaste:	37,2 %	

Ankkurin leikkauskestävyys (valmistajan arvo)	2	kN
Leikkausvoima / ankkuri	0,14372	kN
Käyttöaste:	7 %	

U-arvo

Sivu 11(15)
15.4.2016

KOHDE	Esimerkki							
Osoite:	Esimerkkitie 16, 00000 Kaupunki							
Tilaja:	As Oy Esimerkki							

US1 Vanha	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK) R ($m^2 \cdot K/W$)	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
					Betoni 150	Lämmön- riste 90	Betoni 50				
		0,13	1,2	0,06	1,2	0,041667	0	0	0	0	0,04
	R_T	1,83667 ($m^2 \cdot K/W$)									
	U-arvo	0,55 W/ $m^2 \cdot K$									

US1 Uusi	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK) R ($m^2 \cdot K/W$)	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
					Betoni 150	Lämmön- riste 90	Betoni 50	Lämmön- riste 50	Tuulensuo- ja 50	Ilmarako 30	Verhous
		0,13	1,2	0,06	1,2	0,033	0,031	0	0	0	0,04
	R_T	4,96472 ($m^2 \cdot K/W$)									
	U-arvo	0,21 W/ $m^2 \cdot K$									

$$\frac{US1\ Uusi}{US1\ Vanha} = 0,382$$

U-arvo

 Sivu 12(15)
 15.4.2016

US2 Vanha		R _{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R _{se}
Materiaali			Betoni	Lämmöneriste	Betoni						
Ainevahvuus (mm)			70	90	50						
λ _D (W/mK)			1,2	0,06	1,2						
R (m ² · K/W)		0,13	0,058333	1,5	0,041667	0	0	0	0	0	0,04
R _T	1,77 (m ² · K/W)										
U-arvo	0,57 W/m ² · K										

US2 Uusi		R _{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R _{se}
Materiaali			Betoni	Lämmöneriste	Betoni	Lämmöneriste ja	Tuulensuoja	Ilmarako	Verhous		
Ainevahvuus (mm)			70	90	50	50	50	30			
λ _D (W/mK)			1,2	0,06	1,2	0,033	0,031	0			
R (m ² · K/W)		0,13	0,058333	1,5	0,041667	1,515152	1,612903	0	0	0	0,04
R _T	4,89805 (m ² · K/W)										
U-arvo	0,21 W/m ² · K										

$$\frac{US2\ Uusi}{US2\ Vanha} = 0,368$$

U-arvo

Sivu 13(15)
15.4.2016

US3 Vanha	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK)	R ($m^2 \cdot K/W$)	Kerros								R_{se}	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
		0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
		R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									
		U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

US3 Uusi	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK)	R ($m^2 \cdot K/W$)	Kerros								R_{se}	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
		0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
		R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									
		U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

$$\frac{US3\ Uusi}{US3\ Vanha} = 1,000$$

U-arvo

 Simu 14(15)
 15.4.2016

US4 Vanha	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK) R ($m^2 \cdot K/W$)	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
	R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									0,04
	U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

US4 Uusi	Materiaali Ainevahvuus (mm) λ_D (W/mK) R ($m^2 \cdot K/W$)	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
	R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									0,04
	U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

$$\frac{US4\ Uusi}{US4\ Vanha} = 1,000$$

U-arvo

Sivu 15(15)
15.4.2016

USS Vanha	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
Materiaali										
Ainevahvuus (mm)										
λ_D (W/mK)										
R ($m^2 \cdot K/W$)	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									
U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

USS Uusi	R_{si}	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerros 4	Kerros 5	Kerros 6	Kerros 7	Kerros 8	R_{se}
Materiaali										
Ainevahvuus (mm)										
λ_D (W/mK)										
R ($m^2 \cdot K/W$)	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
R_T	0,17 ($m^2 \cdot K/W$)									
U-arvo	5,89 $W/m^2 \cdot K$									

$$\frac{USS\ Uusi}{USS\ Vanha} = 1,000$$