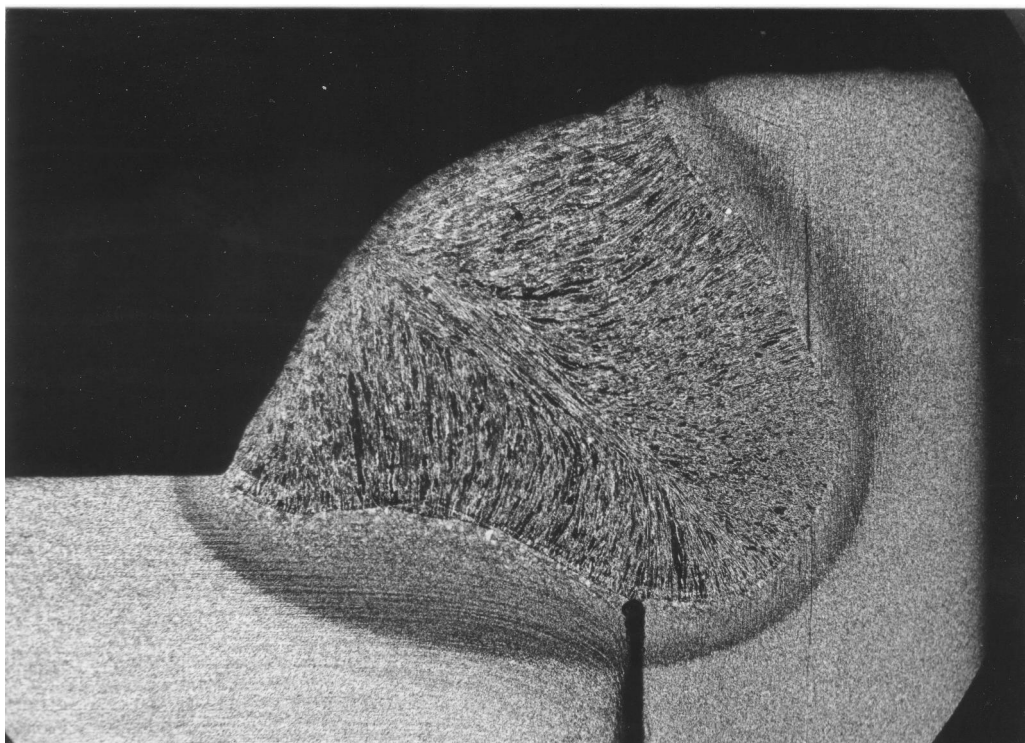


LAAJARUNKOISTEN LIIKUNTAHALLIEN RAKENTEELLINEN TUR-  
VALLISUUS

Tutkimusraportti

**STAATTISESTI KUORMITETTUIJEN HITSAUS-  
LIITOSTEN SUUNNITTELU**



OPETUSMINISTERIÖ  
YMPÄRISTÖMINISTERIÖ  
TERÄSRAKENNEYHDISTYS RY

Versio 19.7.2006

Tapio Leino  
VTT



# Sisällysluettelo

## TIIVISTELMÄ

## ALKUSANAT

<b>1. YLEISTÄ</b>	5
1.1 Hitsausliitoksen laskennallisen mitoitustarpeen määrittely	6
<b>2. LIITOSRAKENTEEN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI</b>	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Voimaliitoksen rakenteen valinta	11
2.3 Liitostyyppin valinta kestävyuden mukaan	11
2.4 Liitostyyppin optimointi - esimerkki	13
2.5 Sitkeästi toimiva liitos	17
<b>3. PIENAHITSAUKSEN TOIMIVUUSEHDOT</b>	21
3.1 Pienahitsien käytön ehdot	21
3.2 Esimerkki - Korvakkeen irtoaminen	22
3.3 Esimerkki - Hitsien leikkautuminen vetovoimasta	25
3.4 Esimerkki - Hitsausliitosten virhealttius	27
3.5 Esimerkki - Matalapalkkiliitokset	28
3.2 Esimerkki - Sitkeät ja hauraat rakenneosat	34
<b>4. MITOITUSOHJEET JA SOVELLETTAVAT STANDARDIT</b>	39
4.1 Hitsausliitosten mitoitus - ohjeet	39
4.2 Sovellettavat standardit	41
4.3 Hitsattujen teräsrakenteiden kelpoisuus	42
<b>5. PIENAHITSIN MITOITTAMINEN OSAVARMUUSKERTOIMIIN PERUSTUVASSA MITOITUKSESSA</b>	44
5.1 Perusoletukset	44
5.2 Perusmitoitusmenetelmä	44
5.3 Yksinkertaistettu menetelmä	47
5.4 Pitkät hitsit	47
<b>6. AINETTARIKKOMATON HITSAUSLIITOKSEN TESTAUS</b>	48
6.1 Silmämääräinen tarkastus	49
6.2 Radiograafinen kuvaus	50
6.3 Ultraäänitarkastus	51
6.4 Magneettijauh tarkastus	52
6.5 Tunkeumanestetarkastus	54
<b>7. HITSIEN LAATU JA HITSAUSVIRHEET</b>	56
7.1 Hitsausliitos	56
7.2 Mikä on hitsausvirhe	57
7.3 Hitsivirheiden vaarallisuus	58
7.4 Hitsiluokka ja hitsausvirheiden estäminen	60
<b>Lähdeluettelo</b>	64

**Liite 1 – Mitoitus-esimerkit 1-3**

## TIIVISTELMÄ

Oheinen hitsausliitosten suunnittelun ohje on havaittu tarpeelliseksi, kun on tutkittu vuoden 1980 jälkeisiä teräsrakenteiden vaurio- ja sortumatapauksia ja niiden syitä ja riskitekijöitä. Useimmissa vauriotapauksissa on ollut kyse monista samaan aikaan vaikuttaneista syistä, joiden yhteisvaikutuksesta on lopulta tapahtunut jokin onnettomuus tai rakennevaurio ja sortuma. Monissa tapauksissa on vaurioon ja sortumaan johtavana alkusyynä ollut hitsausliitos.

Hitsausliitosten mitoittamiseen on olemassa standardi SFS 2373 ja mitoitusta on myös käsitelty eurooppalaisissa suunnitteluohjeissa EC3, mutta kummassakin lähtökohtana on valittu liitosrakenne, jonka hitsien a-mitat pitää määrittää. Hitsejä sisältävien liitosten rakenteiden muotoilua, valintaa tai suunnittelua ei käsitellä missään määräyksissä tai ohjeissa, eikä teräsrakennealalla löydy siihen mitään yleisiä oppaita. Suurin osa todetuista virheistä on kuitenkin tehty valmisosien kokoonpanoliitosten muotoilussa, tai niiden ominaisuuksien valinnassa.

Rakennesuunnitteluohjeet sisältävät riskianalyysiin perustuvat varmuuskertoimet, joiden mukaisesti suunniteltaessa rakenteiden pitää kestää kaikki normaalit materiaali-poikkeamat sekä rasitus- ja kuormitusilanteet koko niiden käyttöiän. Hitsausliitosten kannalta ongelmallista on ollut rasitusilanteiden määrittäminen. Suunnittelijat joko eivät ole osanneet määrittellä liitoksen kullekin komponentille (ja hitsille) määräävää kuormitusyhdistelmää, tai on unohdettu kuormia ja kuormitusyhdistelmiä. Rakenteet ovat herkistyneet vaurioille myös, kun valmistuksessa on poikettu alkuperäisistä suunnitelmista suunnittelijaa kuulematta, tai on käytetty halvempia ja erilailla spesifioituja osia tai materiaaleja kuin suunnitelmissa.

Rakenneteknisten ratkaisujen ja suositusten esittelemiseksi raportissa on hyödynnetty valokuvia ja tietoja mm. onnettomuustutkinnassa olleista tunnetuista vauriotapauksista.

## ALKUSANAT

Hitsausliitosten suunnitteluun tarkoitettu ohje on laadittu osana laajempaa tutkimusta, jota ovat rahoittaneet opetusministeriö, ympäristöministeriö, VTT, Teräsrakenneyhdistys ja Wood Focus. Osa tutkimuksen projekteista on koskenut puurakenteita.

Oheiset ohjeet on laadittu rahoittajien muodostaman johtoryhmän ohjauksessa. Ohjeen tekstiä on kommentoitu Normitoimikunnan ja Teräsrakenteiden pääsuunnittelijan pätevyyskurssien kouluttajien toimesta. Projektin johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

- Risto Järvelä, opetusministeriö, [Risto.Jarvela@minedu.fi](mailto:Risto.Jarvela@minedu.fi)
- Teppo Lehtinen, ympäristöministeriö, [Teppo.Lehtinen@ymparisto.fi](mailto:Teppo.Lehtinen@ymparisto.fi)
- Unto Kalamies, Teräsrakenneyhdistys ry, [Unto.Kalamies@rakennusteollisuus.fi](mailto:Unto.Kalamies@rakennusteollisuus.fi)
- Jaakko Huuhtanen, ympäristöministeriö, [Jaakko.Huuhtanen@ymparisto.fi](mailto:Jaakko.Huuhtanen@ymparisto.fi)
- Pekka Nurro, Woodfocus, [Pekka.Nurro@woodfocus.fi](mailto:Pekka.Nurro@woodfocus.fi)
- Tapani Tuominen, SPU Systems Oy, [Tapani.Tuominen@spu.fi](mailto:Tapani.Tuominen@spu.fi)

Lisäksi johtoryhmän kokouksiin osallistuivat:

- Tapio Leino, VTT, [Tapio.Leino@vtt.fi](mailto:Tapio.Leino@vtt.fi) (johtoryhmän sihteeri)
- Mauri Peltovuori, [Mauri.Peltovuori@minedu.fi](mailto:Mauri.Peltovuori@minedu.fi)
- Markku Korttesmaa, VTT, [Markku.Korttesmaa@vtt.fi](mailto:Markku.Korttesmaa@vtt.fi)

# 1. YLEISTÄ

Rakenne- ja liitossuunnittelukokonaisuus jakautuu käytännössä kahteen eri tehtävään, jotka ajoittuvat rakentamisprojektin eri vaiheisiin:

1. Rakenteiden ja rakenneosien suunnittelu ja tarjouslaskenta, ja
2. rakenteen osien ja rakenteen yksityiskohtien mitoittaminen.

Ensimmäisessä vaiheessa ei aina valita liitosten lopullista osakokoonpanoa, tai mitoiteta sen osia. Ainoa päätös koskee yleensä sitä toimiiko liitos nivelenä tai jäykkänä, vai sovelletaanko osittain jäykkien liitosten tekniikkaa. Liitossuunnittelu on osa toteutussuunnittelua.

## LIITOSTEN TOTEUTUSSUUNNITTELU

Liitosten ja erityisesti hitsiliitosten **suunnittelu** on tehtävä, joka primääristi ajoittuu vasta siihen vaiheeseen, kun rakennus on päätetty toteuttaa. Suunnittelijan tulee tällöin ottaa huomioon rakenteille asetetut olennaiset tekniset vaatimukset koskien kestävyyttä, käyttöikää ja turvallisuutta /2/, ja valita liitostyyppit siten, että niillä on ainakin seuraavat kolme ominaisuutta:

- a) Kuormankantokyky eli kestävyysominaisuus

Liitoksen suunnittelussa on otettava huomioon vaikuttavat rasitukset, joiden välittämiseksi tuotteelta tai rakenneosalta toiselle liitos tulee suunnitella. Liitos tulee valita ja valmistaa siten, että sillä on suunnittelijan oletamat ominaisuudet ja se välittää suunnitellut rasitukset. Liitokselle suunniteltu kuormiensiirtokyky määrää mitä rakenteellisia lisäkomponentteja liitoksessa tai sen kiinnityksessä eri syistä mahdollisesti tarvitaan (ruuvit, laipat, jäykisteet, tukilevyt, tms.).

Esimerkiksi sauvarakenteiden pilari-palkki-liitoksissa voi vaikuttaa palkin suuntainen aksiaalivoima (puristusta tai vetoa), leikkausvoimat ja taivutusmomentit (kahteen suuntaan) ja vääntömomentti, tai joku niiden osajoukko riippuen siitä kuinka liitokset on alun perin suunniteltu toimivaksi (Toimivuus  $\sigma$  rakenneanalyysissä on määritelty rakennelementtikohtaiseta toiminnalliset ja muut reunaehdot ja -arvot).

- b) Rakennettavuus.

Rakenne-elementit ja niiden liitokset tulee suunnitella valmistettavuuden ja asennettavuuden osalta mahdollisimman pitkälle, ja asennusten helpottamiseksi varustella ne jo rakennustuotetehtaassa. Riittävät mahdollisuudet vaihtaa osia tai korjata esim. kuljetuksen aikana tai muulloin vaurioituneita kohtia työmaalla tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Samoin rakennettavuuteen ja tuotteiden laatuun voi vaikuttaa oleellisesti, suoritetaanko tarvittava hitsaustyö konepajassa vai pitääkö se tehdä työmaalla.

Rakennettavuuteen liittyy esim. rakenne-elementtien siirreltävyys, asennettavuus ja sovitaminen, asennuskustannukset, rakentamisen nopeus ja turvallisuus, rakenneosien varastoitavuus, nosteltavuus, materiaaliominaisuuksien vaihtelut, ylläpitotarve, vaihdettavuus tai purettavuus tai jokin niiden yhdistelmä.

c) Liitoksen säädettävyys.

Usein säätämistarve aiheuttaa sen, että liitokset valmistetaan työmaalla ruuviliitoksena, jolloin liitoksen tekemiseen tarvittavat osat hitsataan liitettäviin rakenneosiin konepajassa. Tällöin kaikki ruuvien kautta kulkevat voimakomponentit, mukaan lukien ruuvien epäkeskeisyydestä (suhteessa ruuviryhmän tai hitsausliitoksen taivutuskeskiöön) aiheutuvat taivutusmomentit, siirtyvät ko. hitsausliitosten kautta.

Säädettävyyyteen vaikuttaa rakenteiden tarkkuus ja toleranssit, lämpötila ja sen vaihtelut, pilarien säätövarat pysty- ja sivusuunnissa, osien kaarevuudet ja vinoudet, palkkien kiinnitykset pilarien kylkeen, säätövarat tai tarve mm. taivutusmuodonmuutosten varalta ja nivelliitosten liikevarat. Säädettävyys helpottaa rakennuksen toleranssien yleistä hallintaa ja vähentää mittaustyön tarvetta.

Liitosten sovitteet tai sovitepalat, ja niiden käyttäminen tai huomioon ottaminen, helpottavat rakenteiden säätämistä paikoilleen asennusvaiheessa, mutta voivat lisätä epäkeskeisyyksiä, jotka sitten pitää ottaa mitoituksessa huomioon!

d) muut mahdolliset tarvittavat ominaisuudet, kuten esimerkiksi palonkestävyys tai jotkut rakennusfysikaaliset ominaisuudet, joiden vaatimukset koskevat rakennuksen koko pintaa riippumatta siitä miten pinta on rakennettu tai mitä komponentteja siihen kuuluu.

Hitsausliitosten **mitoittaminen** on tehtävä, mikä alkaa sen jälkeen kun liitoksen osakokoonpano ja liitoksen ominaisuudet on valittu. Mitoittamiseen liittyy hitsityyppien ja hitsien pituuksien ja paikkojen valintaa sekä hitsien a-mittojen määrittämistä. Mitoitusohjeet /1/ löytyvät sovellettavasta standardista /5, 6/ tai Eurokoodista (ks. kohta 4). Hitsien valmistuksen laadunvarmistukseen on käytettävissä uusi Teräsnormikortti N:o 18/2005 /17/.

## 1.1 Hitsausliitoksen laskennallisen mitoitusarpeen määrittely

Vaurio- ja sortumistapausten selvityksissä on käynyt ilmi, että hitsausliitosten laskentaa ei ole joko tehty ollenkaan tai siinä on tehty pahoja virheitä. Joissakin tapauksissa puute on koskenut kohteen dokumentaatiota, jonne hitsilaskelmia ei aina ole sisällytetty, vaikka muut rakenteiden analyysi- ja mitoituslaskelmat ja dokumentit ovat löytyneet. Laskelmien puuttuminen on kuitenkin merkittävä riskitekijä, koska hitsattujen rakenteiden ja liitosten riittävä kestävyys, ja käytännössä hitsiliitosten pääasiallinen vaatimuksenmukaisuus, voidaan todeta vain mitoituslaskelmista, ja niiden puute viittaa suunnittelun laatu järjestelmän puutteisiin!

Niihin liitoksiin, joiden suunnittelusta ja mitoittamisesta ei ole toimitettu eri komponenttien mitoituslaskelmia, tai joita ei ole dokumentoitu taulukon 1 mukaisesti, saattaa sisältyä merkittävästi kohonnut vaurio- tai sortumisriski!

Hitsausliitosten suunnittelusta ja mitoittamisesta tulee projektieritelmässä käsitellä seuraavat taulukossa 1 listatut asiat ja kysymykset:

**Taulukko 1.** Hitsausliitosten suunnittelu ja dokumentointi.

	Dokumentoinnin aihe
1	Luettelo rakenteen staattisesti ja/tai väsyttävästi kuormitetuista liitoksista. Mikäli kohteen sortumisesta voi olla seurauksena henkilövahinkoja, väsytytkuormitetuista liitoksista tulee lisäksi esittää perustelut käytetyille osavarmuusluvuille!
2	Liittyykö johonkin hitsausliitokseen dynaaminen (mutta ei väsyttävä) kuormitus (esimerkiksi kaikki primääristi tuulikuorman rasittamat liitokset)?
3	Ohjeen B7 mukainen luettelo hitsausliitoksista, joiden hyväksikäyttöaste ylittää arvon 0,5. Tähän voidaan liittää tarkastelu koskien sitä, onko kyseessä kahden primäärirakenteen, vai primääri- ja sekundäärirakenteen välinen hitsausliitos, koska merkittävin vaurioitumisriski on primäärirakenteiden välisissä liitoksissa.
4	Selvitys siitä kuinka hitsausliitokset valmistetaan kuten standardi SFS2373 edellyttää "yhteisymmärryksessä suunnittelijan kanssa", ja kuinka mahdolliset muutokset suunnitelmiin käsitellään ja hyväksytetään liitosten suunnittelijalla.
5	Luettelo liitoksista, jotka tehdään rakenneosiin, joiden perusainetta on kylmämuovattu (esim. kylmämuovautut putkiprofiilit), sekä tarkastelut kylmämuovauksen määrästä, joka ei saa ylittää 5 %. Tähän on liitettävä tarkastelut koskien hitsien etäisyyttä kylmämuovautusta alueesta. - Standardin SFS 2373 mukaan etäisyyden pitää olla yli 5s, missä s on kylmämuovautun levyn paksuus, tai vaihtoehtoisesti pitää käyttää alumiinilla tiivistettyä terästä.
6	Projektieritelmässä on syytä esittää sellaiset hitsausliitokset, missä perusmateriaalilta vaaditaan sitkeyttä materiaalin paksuussuunnassa, sekä laskelmat materiaalilta vaadittavasta Z-luokasta, jolloin lamellirepeilyn vaaraa ei esiinny.
7	Hitsausliitosten mitoituslaskelmiin on syytä merkitä selvästi, onko hitsin suunta sama kuin määräävän kuormituksen suunta, vai onko mitoitettava hitsi esim. koh-tisuorassa suunnassa määräävään kuormitukseen.
8	Hitsausliitosten mitoituslaskelmissa tulee selkeästi esittää kuormitusten epäkeskeisyydet verrattuna hitseihin (epäkeskeisyyksistä aiheutuu hitseihin muuttuvia jännitysjakautumia, joille standardin SFS2373 mitoituskaavat sopivat vain poikkeustapauksissa).
9	Tarkastelut koskien hitsausliitosten pituuksia, joiden pitää olla vähintään 50 mm tai 8a, missä a on hitsin a-mitta? Standardin SFS2373 mukaan näitä mittoja lyhyempiä hitsejä ei tule hyödyntää mitoituslaskelmissa.
10	Tarkastelut koskien hitsausliitosten herkkyyttä jatkuvan sortuman suhteen. Onko hitsausliitokseen vaikuttavan määräävän kuormituksen mahdollista kulkea muuta kautta, jos yksittäinen hitsi vaurioituu tai siinä on valmistusvirhe?
11	Suunnitelmat koskien sovituserheen välttämistä tai tarvittaessa sen kompensointia hitsin a-mitassa, mikäli liitettävien osien väliin jää rakoja.
12	Tarkastelu koskien hitsausliitoksella toisiinsa liitettävien kappaleiden jäykkyyksiä; onko rakenteen suhteellinen jäykkyys sama liitoksen molemmiin puolin, eli päteekö Bernouillyn periaate (poikkileikkauksen tasomaisuus taivutuksessa). Tai onko liit-tyvien osien muodonmuutokset otettu huomioon (vrt. pienahitsauksen ehdot)?
13	Selvitys siitä kuinka on tarkoitus valvoa kuormaa kantavien liitosten hitsien val-mistuksen laatua, jotta ne täyttävät standardin SFS-EN 25817 /11/ mukaisen hitsi-luokan (teräsrakentamisessa vaaditaan C) vaatimukset? Vrt. uusi Teräsnormikortti N:o 18/2005 /18/.

Hitsausliitosten mitoituslaskelmia ei ole erikseen mainittu suunnitteluohjeissa (esim. B7 /1/) tai muissa dokumentaatioesityksissä /18/, missä on lueteltu tyypillisen projektieritelmän sisältö. Ne kuitenkin kuuluvat osana rakennuksen vaatimuksenmukaisuuden toteamiseksi koottavaan aineistoon, koska rakenteiden kestävyyttä (Maankäyttö- ja rakennusasetus, 50 §) tai turvallisuutta ei voida ilman rakennekoetuloksia todeta mistään muusta dokumentaatiosta. Rakennushankkeeseen ryhtyvän tahon tulee huolehtia, että tällainen aineisto kootaan.

## 2. LIITOSRAKENTEEN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

### 2.1 Yleistä

Rakenteiden lujuus/kestävyystekninen suunnittelu kohdistuu kahteen pääkohtaan:

- a) liittyvien rakenneosien, kuten pilarit, palkit, laatat, tms., mittojen, paksuuksien ja/tai profiilien valinta ja mitoitus, sekä varustelu, ja
- b) edellä mainittujen rakenneosien välisten kokoonpanoliitosten määrittäminen ja mitoitus.

Tässä konfiguroinnilla (liitosrakenteen suunnittelu) tarkoitetaan liitoksen ja sen muodostamien komponenttien ja niiden kokoonpanon määrittämistä. Kokoonpanoliitoksella tarkoitetaan rakenne-elementtien välistä liitosta, joka valmistetaan työmaalla. Kuvassa 1 on erilaisia pilari-palkki-liitosten osakokoonpanoja, joita voi vertailla keskenään niiden jäykkyyden ja taivutusmomenttikestävyys-suhteen. Osa liitoksista on nivelellisiä ja osa "täysin" jäykkiä.

Todellisuudessa kaikkien kuvan 1 liitosten ominaisuudet ovat jossakin nivelen ja täysin jäykän välillä, jäykkyyserojen ollessa merkittävän suuria. Liitoksen alkujäykkyys riippuu liittyvistä osista, eri jäykistelevyjen paksuuksista ja muista liitososista, sekä niiden sijainnista. Eurocode 3 /2/ luokittelee liitokset niiden alkujäykkyyden (kuva 2), taivutusmomenttikestävyys-suhteen (kuva 3) ja muodonmuutoskyvyn perusteella. Liitoksen sitkeys ei ole suorassa suhteessa sen jäykkyyteen vaan kyseinen ominaisuus riippuu oleellisesti liitoksen heikoimman osan muodonmuutoskyvystä. Usein jokin hitsi on liitoksen suhteellisesti heikoin osa. Tällöin on oleellista, että hitsimateriaali toimii sitkeästi. Liitosten ja niiden yksityiskohtien valinnan osalta suunnittelijan on oleellista tietää, että:

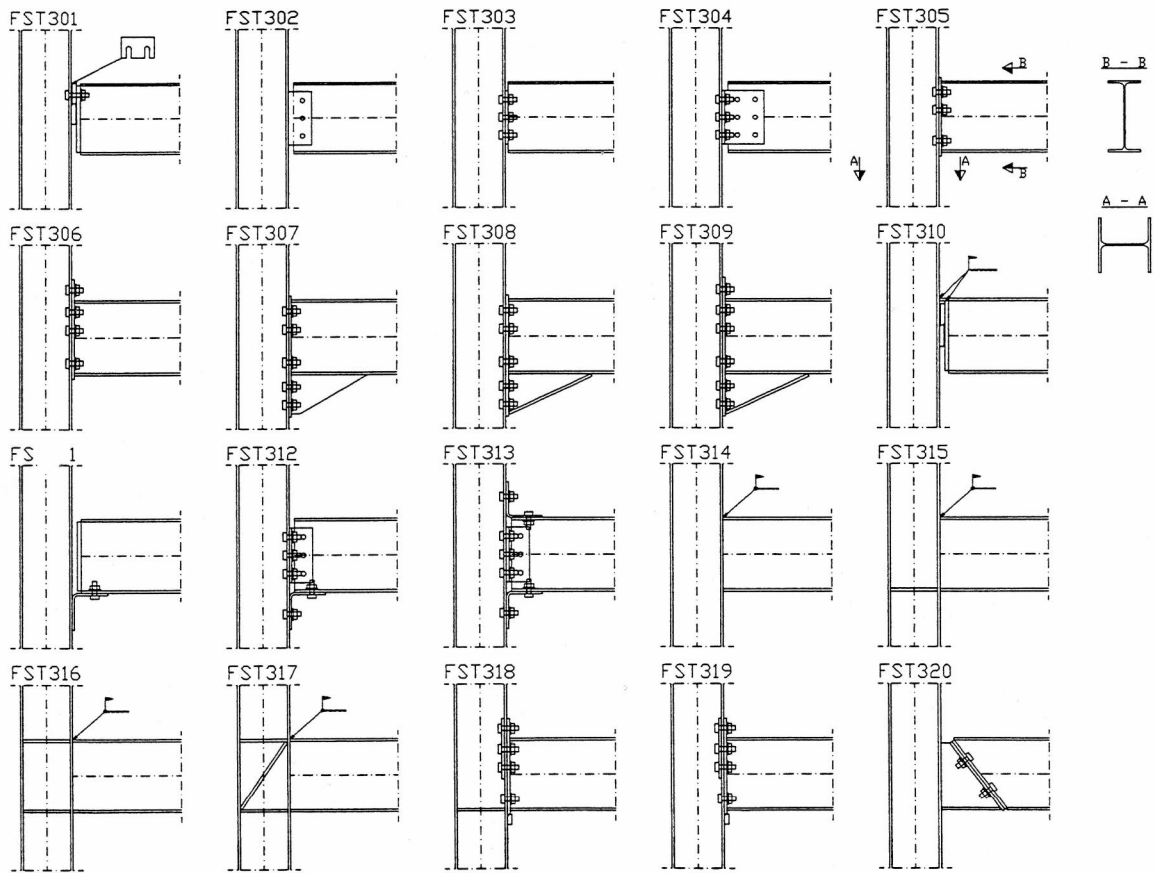
Rakenneosien (palkit, pilarit) suunnittelun perusteena ollut rakenneanalyysi (esimerkiksi FEM-laskenta) antaa vääriä tuloksia /13/, jos laskentamallissa käytettyjen nimellisesti täysin jäykkien liitosten **todellinen jäykkyys** on riittämätön, eli jos se on olennaisesti pienempi kuin mitä vaaditaan liitoksen luokitteluksi täysin jäykäksi.

Liitoksen todellinen rakenne pitää valita sen laskentamallin mukaiseksi!

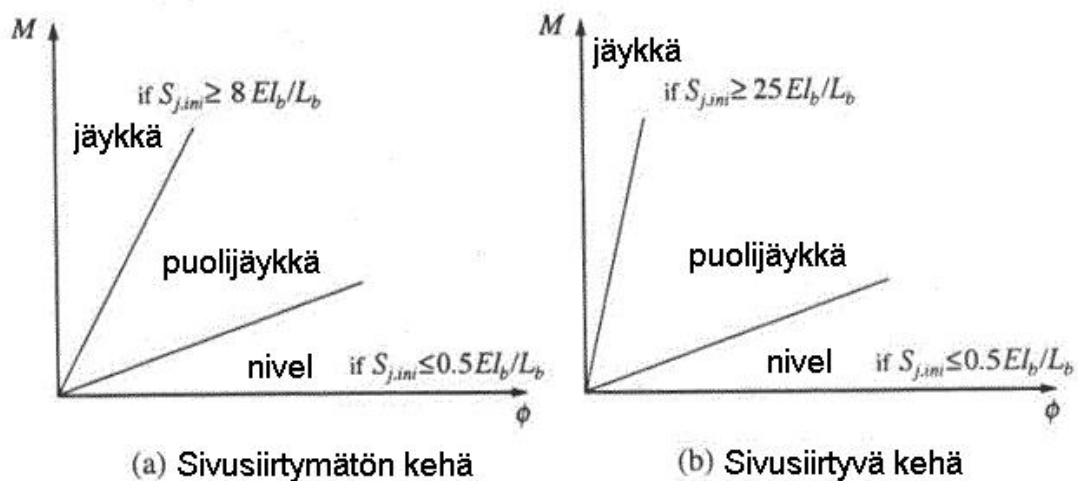
Rakeneanalyysimallin virhe näkyy kehien sauvojen voimasuureiden jakautumisessa. Yleensä, jos liitoksen todellinen valittu alkujäykkyys on liian pieni, eikä asiaa tarkisteta, kehien pilarien todelliset taivutusmomentit voivat olla paljon laskettua suurempia, mikä on riski koko rakenteen kantokyvyn suhteen. On yleisesti katsottu merkittäväksi sortumisen riskitekijäksi,



jos rakenteiden kuormittaminen aiheuttaa plastisia niveliä joko liitoksiin tai pilareihin. Siitä saattaa myös aiheutua riski koko rakenteen sortumiselle.



**Kuva 1.** Pilaripalkkiliitosten osakokoonpanoja, joilla erilaisia ominaisuuksia /Finnsteel/.



**Kuva 2.** Liitosten luokittelu alkujäykkyyden  $S_{j.ini}$  mukaan a) sivusiirtymättömissä (yleensä diagonaalijäykistys tms.), ja b) sivusiirtyvissä kehissä.

Äärettömän jäykkää liitosta (jollaisena moni liitos mallinnetaan rakenneanalyysissä) ei ole olemassa. Käytännössä kaikki "jäykätkin" liitokset ovat osittain jäykkiä (kuva 2, "puolijäykkä" alue).

Mikäli liitoksen alkujäykkyys ja käytettävä liitososakokoonpano on valittu oikein, ja on riittävän jäykkä, kehän sauvojen voimasuureiden virheet ovat rakenneanalyysissä alle 5 %, vaikka liitos on mallinnettu todellisen jäykkyyden sijasta täysin jäykkänä. Tämä virhe on eurocode -ohjeiden mukaan hyväksyttävissä.

Kuvassa 2 mainituista alkujäykkyyden  $S_{j,ini}$  raja-arvoja kuvaavista ehdoista voi havaita, että:

Pilari-palkki-liitoksen laskennallinen alkujäykkyyden  $S_{j,ini}$  arvo on suoraan verrannollinen palkin jäykkyyteen  $E_{ib}$  ja kääntäen verrannollinen palkin pituuteen  $L_b$ , mikä käytännössä merkitsee että

$$< = >$$

Mitä pitempi on palkin jänneväli, sitä helpommin liitos voidaan luokitella ja mallintaa täysin jäykkänä, tai että

lyhyemmillä palkeilla jokin melko jäykäksi kuviteltu liitosrakenne voidaan joutua luokittelemaan joko osittain jäykäksi tai niveleksi, ellei liitoksen alkujäykkyyttä kasvateta tai liitosrakennetta vaihdeta.

Edellä mainitut tekniset seikat merkitsevät käytännössä myös sitä, että rakenteen vaurioitumisriski lisääntyy, mikäli rakenneanalyysijä (runkosuunnittelu) ja liitosten suunnittelua ei koordinoita riittävästi mukana olevien tahojen toimesta.

Eurocode 3:n jäykkyysehto liitoksille aiheuttaa, että liitosten varustelu on tehtävä erityisellä huolella, ja varusteluosat liitetään palkkiin ja pilariin yleensä hitsausliitoksilla /4, 9/!

Rakennesosat ovat yleensä puolivalmisteita tai ns. rakennustuotteita, jotka tehdään joko rakennustuotetehtaassa tai konepajassa. Osien tehdasliitoksiin kohdistetaan normaali tehdasvalmistuksen laadunvalvonta. Hitsausliitosten laadunvarmistusta käsitellään myöhemmin /17/.

Rakennustuotteet kuljetetaan rakennuspaikalle ja liitetään yleensä toisiinsa ruuviliitoksilla, joiden valmistelu (eli ko. rakennesosien varustelu) on tehty tehtaassa tai konepajassa käyttäen tyypillisesti hitsausliitoksia. Osiin on kokoonpanoa varten hitsattu kiinnikkeitä tai laippoja tms. Itse liittäminen tapahtuu työmaalla usein miten ruuveilla (vrt. kuva 1).

Rakennesuunnittelija valitsee profiilit tai puolivalmisteet, ja määrittää rakenneanalyysin voimasuureista lähtien sopivan liitososakokoonpanon ja sen ominaisuudet. Kokoonpanoliitosten yksityiskohdat ja osat mitoitetaan tarkemmin vasta kun rakennuskohde päätetään toteuttaa. Teräsrakenteiden kohdesuunnittelu on enimmäkseen aiemmin valittujen liitosten osien mitoitusta ja konepajapiirrosten laadintaa.

Mikäli eri rakenneosien täysin samanlaisten kokoonpanoliitosten lukumäärä on suuri, kuten on usein asianlaita teollisuus- ja liikuntahallirakentamisessa, liitosten mitoitus on syytä tehdä kahdessa vaiheessa: 1) valitaan ja optimoidaan liitoksen osakokoonpano, ja 2) mitoitetaan liitoksen rakennekomponentit, kuten jäykisteiden levynpaksuudet, ruuvien lukumäärät ja koot sekä hitsien a-mitat yms.

## 2.2 Voimaliitoksen rakenteen valinta

Rakenteiden ja liitosten alustava valinta tehdään ennen rakenteen rakenneanalyysiä. Liitosten ominaisuudet valitaan sen mukaan, minkälaista toimintaa niiltä vaaditaan, ja ne mallinnetaan vastaavasti /16/. Liitosten toimivuus on määriteltävissä eo. kohdassa mainituilla ominaisuuksilla, joiden toteutuminen riippuu olennaisesti siitä, kuinka hyvin rakennuttaja on varmistunut siitä, että suunnittelijan tekemät oletukset ja rakenneratkaisut, toteutetaan työmaalla rakennusta valmistettaessa ja asennettaessa /4, 7, 18, 24/:

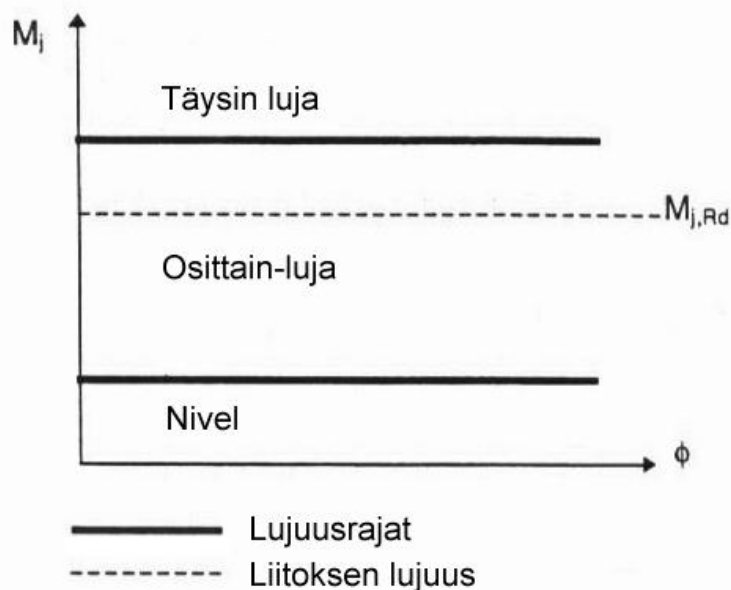
- 1) Kuormitusten siirtokyky liitoksen ylitse.
- 2) Rakennettavuus.
- 3) Säädettävyys.
- 4) Palonkestävyys.

Liitosten palonkestävyyteen liittyy samat vaatimukset ja tekijät kuin rakenneosien palonkestävyyteen eikä sitä käsitellä tässä.

Monissa tapauksissa rakennesuunnittelu on jakautunut eri tahoille, jolloin suunnitelmien pitää yhdessä muodostaa toivotulla tavalla toimiva vaatimustenmukainen kokonaisuus. Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan yksi suunnittelijoista tulee tällöin nimetä ko. kokonaisuudesta vastuulliseksi suunnittelijaksi ja kokonaisuuden hallintaan ja laadunvarmistukseen liittyvät kysymykset tulee käsitellä projektin aloituskokouksessa /8, 12, 19/.

## 2.3 Liitostyyppin valinta kestävyuden mukaan

Liitostyyppin valinta tehdään ottaen huomioon alkuperäiset liitosta määritettäessä tehdyt päätökset, ja rakenteiden analyysin tulokset. Oleellista liitostyyppin valinnassa on ottaa huomioon rakenteelta vaadittu pääasiallinen toimintatapa, eli onko kyseessä nivel vai jäykkä liitos, tai jotain siltä väliltä. Koska täysin jäykkää liitosta ei ole olemassa, esimerkiksi Eurocode-ohjeissa on annettu liitoksen kestävyydelle (kuva 3) ja alkujäykkyydelle (kuva 2) raja-arvoja, joiden perusteella eri liitostyyppit voidaan luokitella täysin lujaksi - osittain lujaksi - alilujaksi tai niveleksi, ja vastaavasti jäykäksi - osittain jäykäksi - nivelelliseksi /1, 4, 7/. Kuhunkin luokitukseen liittyy erilainen rakenteiden analysointimenetelmä.



**Kuva 3.** Liitosten luokittelu lujuuden (kestävyyden) mukaan. Liitokset mitoitetaan yleensä joko nivelelliseksi tai täysin lujaksi. Nivelinä niiltä vaaditaan myös kiertymiskykyä.

Kuvan 3 mukaisesti liitokset mitoitetaan (lujuusrajat):

- nivelliitoksena, kun  $M_{Rd} \leq 0,25 \cdot M_{pl,Rd}$
- osittain lujana liitoksena, kun  $0,25 \cdot M_{pl,Rd} < M_{Rd} < M_{pl,Rd}$
- täysin lujana liitoksena, jos kiertymiskyky tarkistetaan, kun  $M_{Rd} \geq M_{pl,Rd}$
- täysin lujana liitoksena, kun kiertymiskykyä ei tarkisteta, kun  $M_{Rd} \geq 1,2 \cdot M_{pl,Rd}$

$M_{Rd}$  on määrävän kuormitusyhdistelyn aiheuttama taivutusmomentti liitoksessa, ja  $M_{pl,Rd}$  on siihen liittyvän palkkiprofiilin plastinen taivutusmomenttikestävyys. Edellä olevan raja-arvon  $1,2 \cdot M_{pl,Rd}$  tarkoituksena on varmistaa, että liitoksella on riittävä lujuus siten, ettei minkään onnettomuuskuorman mahdollisesti aiheuttama plastinen nivel synny liitoksen alueelle.

Nivelliitokset mitoitaa pääasiassa jokin leikkausvoimakomponentti. Jäykät liitokset mitoitaa lähinnä taivutusmomentti. Mitoittajan tehtävänä on tarkistaa, että liitos ja sen eri komponentit kestävät niille suunnitellut rasitukset, eikä liitoksessa vaikuta muita kuormituksia. Joissakin tapauksissa tästä voi varmistua ainoastaan projektieritelämään tehtävillä asennustyöohjeilla.

Rakenneanalyseissä käytettävä "äärettömän jäykkä" liitos on sellainen, jonka tyyppi valitaan siten, että sen taivutusmomenttikestävyys ja alkujäykkyys ylittävät kuvassa 2 vaaditut raja-arvot. Mikäli liitoksen kestävyys on riittävä, mutta alkujäykkyys jää tavoitearvon alapuolelle, rakenneanalyysin tuloksissa on todennäköisesti virhettä enemmän kuin 5 %, ja tällöin liitostyyppi pitää vaihtaa, tai ainakin virhe pitää kompensoida mitoitusvaiheessa liitoksen kestävydessä siten, että ehto  $M_{Rd} \geq M_{pl,Rd}$  säilyy. Täten varmistua, että onnettomuustilanteessa ns.

plastinen nivel muodostuu aina liitosten ulkopuolelle, ja yleensä palkkiin. Nivelrakenteissa ei ole tätä ongelmaa.

Liitoksen lopullista mitoittamista varten tarvitaan tiedot suunnitelluista kuormituksista ja muista vaatimuksista /3, 10, 15, 20, 22/. Kuormien kestävyuden lisäksi liitoksen mitoittamisessa tulee tarkistaa, että liitos siirtää ne kuormat, jotka sen on suunniteltu siirtävän, Jos liitoksen on tarkoitus toimia jonkin kuormakomponentin suhteen nivelellisesti, hyvä suunnittelija tekee riskiarvion siitä, voiko liitokseen jossakin onnettomuustilanteessa vaikuttaa muitakin kuormituskomponentteja. Esimerkiksi, nivelliitoksista suunnittelijan tulee todeta, että ne eivät missään tilanteessa ota vastaan liikaa taivutusmomenttia. Edellä todettiin, että Eurocode 3 /2/ määrittää nivelliitoksen taivutusmomentin yläraja-arvoksi 25 % palkin plastisesta taivutusmomenttikestävyydestä.

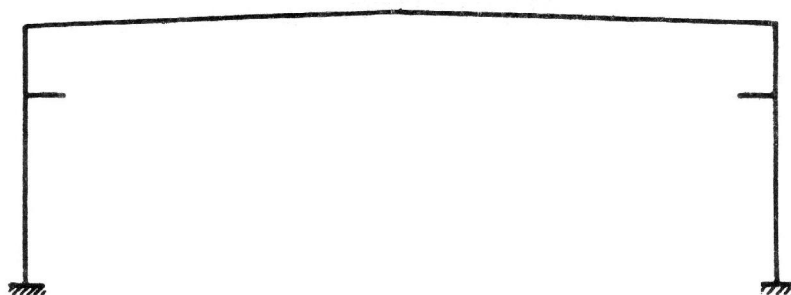
Suomessa tulee esimerkiksi välipohjien rakentamisen yhteydessä valvoa nivelellisten matalapalkkiliitosten osalta, ettei betonin anneta välipohjien pintavalun yhteydessä tukkia välyksiä, jotka tarvitaan turvaamaan nivelliitoksen toiminta, koska liitoskomponentteja ei ole mitoitettu taivutusmomentille /7, 8/.

Sama koskee tulipalotilannetta. Esimerkiksi kerroslaatan alapuolinen tulipalo aiheuttaa laattaa ja palkkeihin lämpöpitenevän tulipalon puolelle /1/, mikä aiheuttaa kerroslaatan alapintaan lämpövenymisen. Materiaalin lämpölaajeneminen laatan alapinnassa taivuttaa yläpuolisia rakenteita (palkkeja ja laattaa) voimakkaasti alaspäin, jolloin palkkien liitoksiin voi yläpintoihin syntyä merkittäviä vetovoimia, joille niitä ei ole mitoitettu.

## 2.4 Liitosten optimointi - esimerkki

Eräässä teräsrakennealan järjestöjen EU-projektissa laadittiin esimerkki teollisuushallin pilarin ja palkin välisen liitoksen määrittelytyöstä, jolla voidaan samalla havainnollistaa liitosten optimointia:

Kyseessä on tavallinen 1-aukkoinen teollisuushalli (kuva 4). Pilarien ulkopintojen väli on 20 m ja hallin kokonaispituus 42 m. Hallin pääkannattajakehien väli on 6 m, nosturin kiskojen korko on 5 m ja kiskojen välinen etäisyys vaakasuunnassa 18,2 m. Harjakattoisen hallin vapaa korkeus on 7 m ja kattokaltevuus 3 %. Kehä on jäykkänurkkainen.

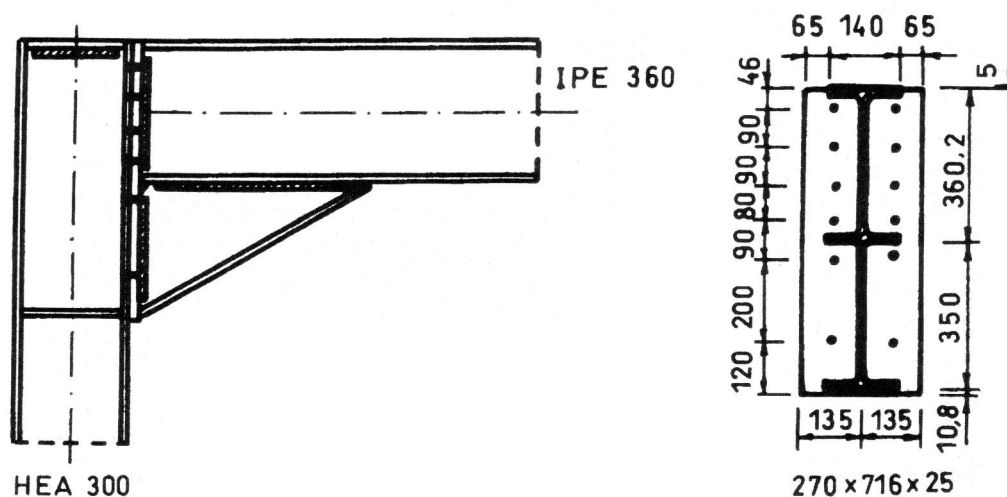


**Kuva 4.** Tyypillinen teollisuushallin poikkileikkaus.

Esimerkin tarkoituksena on käsitellä tapauksia, missä liitos toistuu hallissa monta kertaa täysin samanlaisena ja samassa asemassa. **Yksittäistapauksissa liitosten optimointiin ei kannata ryhtyä.** Se kannattaa mitoittaa yksinkertaisin menetelmin varmalle puolelle.

Kehän pilarin ja palkin välinen nurkkaliitos ja sen osat valittiin käsikirja avulla ja päädyttiin ruuviliitostyyppiin (kuva 5), joka toisaalta ottaa huomioon, että kyseisen jäykkänurkkaisen kehän taivutusmomentin huippuarvo on liitoksen kohdalla, ja toisaalta sallii optimoida palkin poikkileikkauksen. Rakenneanalyysin tulosten perusteella pääkannattajakehän pilareiksi valittiin valssattu I-profiili HEA 300 ja palkiksi IPE 360. Käsikirjoista löytyy vain rajallinen määrä valmiita liitosten osakokoonpanoja, joiden kestävyys voidaan laskea ko. käsikirjan kaavalla. Siksi ensimmäiseksi mieleen tuleva ehdot toteuttava ratkaisu on yleensä runsaasti varmallalla puolella.

Kuvassa 5 nähdään alkuperäinen ko. kohteeseen valittu liitososakokoonpano, missä on useita päällekkäisiä kahden ruuvin ruuvirivejä, lisälevy (kolmio) palkin alalaipan alapuolella ja siinä vielä erillinen alalaippalevy, sekä pilarissa jäykistyslevyt uuman molemmin puolin pilarin päässä ja lisälevyn alalaipan kohdalla.



**Kuva 5.** Käsikirjaliitos, joka on löydettävissä kuormituksen laskenta-arvoilla.

Rakenneanalyysistä saatiin pilari-palkkiliitoksen määrääväksi taivutusmomentiksi 171 kNm ja kuvan 5 alustava liitostyyppi on siis valittu käsikirjasta sen mukaisesti, että pääkannattajapalkki voidaan valita määräävän kenttämomentin mukaan. Ohjeen Eurocode 3 osan 8 (EN 1993-1-8:2005, Design of Joints /27/) aiemman version (Annex J, testattavana kyseiseen aikaan) mukaan laskien koko liitoksen taivutusmomenttikestävyudeksi saatiin kuitenkin 269,6 kNm, eli liitoksessa oli tuntuvasti ylimääräistä kapasiteettia.

Ylimääräinen kapasiteetti ei haittaa, jos liitoksia pitää valmistaa vain muutama. Jos kuitenkin samanlaisten liitosten lukumäärä on suuri, kuten on usein tilanne hallirakentamisessa, liitoksen osakokoonpanoa kannattaa koettaa optimoida sen valmistuskustannusten suhteen. Kuvan 5 liitostyyppin tapauksesta oli laskettu a) taivutusmomenttikestävyys ja b) liitoksen alkujäykkyys, sekä alkuperäisen Eurocode 3 Annex J:n mukaan, että sen uusimman version EN 1993-1-8:2005 /27/ mukaan.

Taulukosta 2 näkyy, että uudemman ohjeversion mukaan liitos voidaan luokitella riittävän jäykäksi, mutta erityisesti sen taivutusmomenttikestävyys on paljon vaadittua suurempi, mikä antaa aiheen selvittää voiko liitosta optimoida, eli muuttaa valmistettavaksi halvemmalla.

**Taulukko 2.** Liitostyyppin luokittelu.

Liitoksen ominaisuus	Vanhempi Annex J	Uusin versio /27/ EN 1993-1-8:2005
Taivutusmomenttikestävyys $M_{Rd}$ (kNm)	269,6	281,6
Liitoksen alkujäykkyys $S_{j,init}$ (kNm/rad)	78 873,6	114,971
Luokittelu	Osittain jäykkä liitos	Jäykkä liitos

Liitoksen alkujäykkyys on tärkeä kriteeri liitostyyppin ominaisuuksia selvitettyä siksi, että ohjeen EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3, Design of Joints /27/ mukaan kehän pilari-palkki-liitokselta vaaditaan tietty alkujäykkyys  $S_{j,init}$  sen varmistamiseksi, että todellisuudessa äärelisen jäykkä liitos voidaan rakenneanalyysissä mallintaa äärettömän jäykkänä liitoksena, ja voidaan kuitenkin varmistua siitä, että analyysin tulosten virhe on pienempi kuin 5 %.

Eurocode:n mukaiseen enintään 5 % suuruisen virheen tavoitteeseen päästään, jos liitostyyppi ja liitoskomponentit valitaan siten, että liitoksen alkujäykkyys  $S_{j,init}$  (kuva 2) on:

- jäykistetyillä (diagonaalijäykistys tms.) kehillä vähintään  $8 \cdot E I_b / L_b$ , ja
- jäykistämättömillä kehillä vähintään  $25 \cdot E I_b / L_b$ .

Kuvan 5 tapauksessa on kyse (erikseen) jäykistämättömästä keharakenteesta, jolloin sen alkujäykkyydeltä vaadittavaksi arvoksi saatiin:

$$S_{j,init} \geq 25 \cdot E I_b / L_b = 85\,627,5 \text{ kNm / rad.}$$

Edellä  $E I_b$  on teräspalkin (IPE 360) jäykkyys, ja  $L_b$  on sen pituus.

Jos liitoksen alkujäykkyys on vain vähän vaatimusta suurempi, se merkitsee, että liitosta optimoitaessa ei kannata koskea sellaisiin komponentteihin, joilla on eniten merkitystä liitoksen jäyhyyden eli sen alkujäykkyyden suhteen. Sellaisia komponentteja ovat palkin lisäksi lähinnä sen alapuolinen lisälevy, sen korkeus, ja alalaipan mitat.

Kuvan 5 liitostyyppistä muunneltu optimaalinen liitostyyppi on sellainen, jonka alkujäykkyys ylittää edellä olevat vähimmäisvaatimukset, ja jonka sisäinen rakenne on sen valmistuksen suhteen kevyin mahdollinen. Tällaisia vaihtoehtoisia rakenteita on mahdollista kokeilla vähentämällä tai ohentamalla liitokseen liittyviä osia eri tavoin siten, että taivutusmomenttikestävyys ja alkujäykkyys kuitenkin pysyvät vaadittujen arvojen yläpuolella.

Taulukossa 3 on laskettu kyseiset arvot kolmelle erilaiselle vaihtoehtoiselle liitososakokoonpanolle. Ko. laskelmista tulee ottaa huomioon, että ohjeen Eurocode 3 (kahden eri version:

aiempi versio: Annex J ja uusi versio: EN 1993-1-8:2005 /27/) mukaisesti laskettu liitoksen taivutusmomenttikestävyys tai alkujäykkyys koskee koko liitosta ja ottaa siis huomioon kaikki sen kiinnityksen osat palkissa, pilarissa ja myös itse liitoskohdassa. Lasketut arvot vastaavat siis ko. liitostyyppin heikoimman kohdan ominaisuuksia.

Liitostyyppin keventämistä voi tutkia joko palkin tai pilarin näkökulmasta, tai vähentämällä kapasiteettia kummaltakin puolelta.

Taulukossa 3 on tutkittu seuraavia rakennevaihtoehtoja:

1. pilarista on poistettu alemmat uumajäykisteet,
2. liitoskohdasta on edellisen lisäksi vähennetty ruuveja (1-2 riviä),
3. pilarista on edellisten lisäksi poistettu yläpään yksi jäykistelevy.

**Taulukko 3.** Alkuperäinen (ohjeen EN 1993-1-8:2005 /27/ mukaan laskettu), ja vaihtoehtoiset liitososakokoonpanot.

Liitososakokoonpano (kts. eo. lista)	Taivutusmomenttikestävyys $M_{Rd}$ (kNm)	Alkujäykkyys $S_{j,init}$ (kNm / rad)	Vaatimuk- senmukai- suus	Suhteellinen Valmistus- kustannus
Alkuperäinen	281,6	114 971,0	OK	100 %
1	255,0	92 706,0	OK	87 %
2	250,6	89 022,0	OK	73 %
3	247,8	87 919,0	OK	72 %

Kaikissa taulukon 3 tapauksissa taivutusmomenttikestävyys (kaikissa kohdissa) ja alkujäykkyys ovat riittäviä verrattuna vaadittuihin arvoihin 171 kNm ja 85 627,5 kNm / rad. Niiden valmistuskustannusten ero on kuitenkin lähes 30 %-yksikköä, mikä merkitsee, että yksittäisiä liitoksia lukuun ottamatta liitosten suunnitteluun kannattaa panostaa. Muilla osakokoonpanoilla olisi voinut tehdä vielä uusia kokeiluja, esimerkiksi käyttämällä palkin alla ohuempaa lisälevyä, joskin sen vaikutus optimoitaviin valmistuskustannuksiin lienee mitätön.

Taulukosta 3 näkee, että alemman jäykisteparin poistaminen (liitososakokoonpano 1) pilarin uuman lommahtamatta on mahdollista, koska pilari on valssattu HE-profiili. Pilarin taivutusmomenttikestävyys pienenee selvästi, mutta pysyy kuitenkin vaaditun yläpuolella. Jäykisteen poistamisen on laskettu vaikuttavan valmistuskustannuksiin alentavasti 13 %.

Liikojen ruuvien ja ruuvireikien vähentämisen (liitososakokoonpano 2) läheltä palkin neutraaliakselia on laskettu vähentävän valmistuskustannuksia vielä 14 %. Kuten voi arvata, keskimmäisten ruuvien poistaminen ei vaikuta merkittävästi taivutusmomenttikestävyuteen.

Pilarin yläpään jäykistelevyn poistamisella liitososakokoonpanon 3 mukaisesti ei saavuteta merkittävää lisäsäästöä. Valssatuilla profiileilla jäykistelevyn jättäminen pois on vertailun perusteella mahdollista, mutta hitsatuilla pilareilla päätylevyn poistaminen voi esimerkiksi aiheuttaa vaaran pilarin ja uumalevyn välisen hitsin vaurioitumiselle (laipan irtirepeäminen



uumasta). Täten hitsatun pilarin uuman ja laipan hitsausliitos on kriittisellä polulla koko liitoksen kestävyuden osalta.

Huom! Edellä ei ole otettu kantaa eri liitososakokoonpanojen rakenteiden sitkeyteen. Sellaisia kestävyuden suhteen kelvollisia liitostyyppiejä tulee pääsääntöisesti välttää, joiden kestävyuden määräävä murtumistapa vastaa haurasta käyttäytymistä.

Ohjeen EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3 - Design of Joints mukaan laadittavat taivutusmomenttikestävyuden ja alkujäykkyyden laskelmat ovat käsin tehtynä erittäin rasakaita, joten liitostyyppien optimointi kannattaa suorittaa jollakin kaupallisella ko. ohjeen mukaisesti laaditulla tietokoneohjelmalla, kuten esimerkiksi CoP tai vastaava.

## 2.5 Sitkeästi toimiva liitos

Oheisessa kuvassa 6 on hitsatuista I-profiileista tehtyjen pilari- ja palkkiprofiilien välinen ruuveilla koottu tyypillinen päätylevyliitos, jota on vahvistettu pilarin uumaa tukevilla jäykistelevyillä. Tällaista liitosta käytetään tyypillisesti, kun pilarin ja palkin välille tehdään ns. jäykkä liitos, eli liitoksen kautta halutaan siirtää palkin aksiaali- ja leikkausvoimia (mahdollisesti kahteen suuntaan) sekä sen vääntö- ja taivutusmomenteja (myös kahteen suuntaan). Taivutusmomentti palkin vahvassa suunnassa saattaa liitoksen kohdalla olla myös joko negatiivinen tai positiivinen.

Valitusta osakokoonpanosta voidaan päätellä, että taivutusmomentti palkin heikommassa suunnassa on melko pieni, koska se siirtyy liitoskohdan ylitse kolmen ruuviparin avulla.

### SITKEYSPERIAATE:

Pilari-palkki-liitoksen mitoittaminen sitkeäksi pitää tehdä siten, että suunnittelija:

- 1) tunnistaa liitoksen tai sen komponenttien erilaiset mahdolliset murtotavat, ja
- 2) vertaa erilaisia murtumistapoja ja vastaavia murtokuormia toisiinsa, ja
- 3) valitsee liitoksen komponentit tai yksityiskohdat siten, että liitoksen heikoin osa käyttäytyy sitkeästi eikä murru heti kun siinä saavutetaan myötöraja.

Tällöin kuormituksen säilyessä tai kasvaessa, momenttiliitos säilyttää kykynsä siirtää tietyn määrän kuormaa (taivutusmomenttia, leikkausvoimaa, myös aksiaalivoimaa) kunnes saavutetaan murtoa vastaava kiertymä. Sitkeysperiaate on oleellisen tärkeä, mikäli rakenteita halutaan suojata nopealta kestävyuden menetykseltä tai hallitsemattomilta kuormien uudelleenjakautumiseen liittyviltä ilmiöiltä ja niiltä ongelmilta, jotka voivat pahimmillaan johtaa jatkuvaan sortumaan.

Edellä oleva sitkeysperiaate on mainittu Eurocode-ohjeissa (SFS ENV 1993-1-1: Eurocode 3 /2/, ja EN 1991-1-7:2004 /20/) yhtenä kolmesta teknisestä keinosta rakentaa turvallisesti siten, että vaurion tai jatkuvan sortuman mahdollisuus vähenee. Muut kaksi keinoja ovat:

- 1) ns. avainelementtien käyttö (rakenteessa on joitakin ylimitoitettuja osia), ja
- 2) kuormitusten siirtymiseen liittyvien vaihtoehtoisten teiden lisääminen.

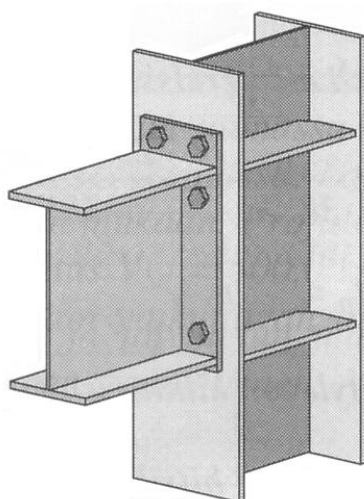
Teräsrakenteisen liitoksen sitkeä käyttäytyminen merkitsee sitä, että kuormitettaessa liitosta sen kestävyyttä suuremmalla kuormalla, liitoksen ensimmäiseksi myötörajalalle joutuva kohta alkaa plastisoitua, ja mahdollinen **lisä**kuormitus jakaantuu edelleen muille rakenneosille. Sitkeä liitos jatkaa edelleen toimintaansa ja kantaa kuormia, menettämättä kestävyytään, kunnes rakenteen jossakin kohdassa saavutetaan murtovenymä tai murtokiertymä.

Työmaaliitoksen mitoitus on sen eri osien mitoittamista ja niiden kestävyyksien vertaamista toisiinsa siten, että valmiin liitoksen heikoin kohta käyttäytyy sitkeästi. Suunnitteludokumenteista tulee selvittää hitsausliitoksen todennäköinen murtotapa. Erityisen tärkeää on selvittää mahdolliset poikkeukselliset tilanteet liitoksissa, jotka on mitoitettu kestävänsä vain jokin tietty yksittäinen voimasuurekomponentti (leikkausvoima tms.).

## LIITOKSEN HEIKOIN KOMPONENTTI

Kuvassa 6 tarkastellaan liitosta, jolla on periaatteessa hyvin monia erilaisia murtumismuotoja. Eri liitostapoja löytää käsikirjoista /16/. Liitoksen komponentit on lueteltu kuvan vieressä. Merkintä S tarkoittaa että kyseinen komponentti käyttäytyy tyypillisesti sitkeästi, kun liitosta kuormitetaan sen määrävällä kuormitusyhdistelmällä. Merkintä H tarkoittaa että komponentti käyttäytyy sitä kuormitettaessa tyypillisesti hauraasti, eli komponentti voi kuormituksen pisyessä tai kasvaessa menettää äkkinäisesti kaiken kantavuutensa.

Kuvan 6 liitoksen suunnittelun ja mitoituksen kannalta olennaista on tunnistaa ne komponentit ja murtumismuodot, jotka edustavat haurasta käyttäytymistä!



### Liitoksen (S)itkeät ja (H)auraat rakenneosat: (liitoksen murtumismuodot)

- Palkin ylälaippa - veto	S
- palkin päätylevyn hitsi ylälaippaan - veto	H(S)
- palkin uuma - leikkaus	S
- palkin uuman hitsi päätylevyyn - leikkaus	S
- palkin alalaippa - puristus	H
- päätylevyn yläosa - taivutus	S
- palkin ylälaipan ruuviliitos	H(S)
- pilarin laippa - taivutus	S
- pilarin uumalevy - leikkaus	S
- pilarin uuman ja laipan hitsiliitos - veto	H(S)
- pilarin uuma ja jäykiste - puristus	H(S)

**Kuva 6.** Pilaripalkki-liitoksen komponenttien ominaisuudet.

Kuvan 6 jako on tehty perustuen ohjeessa EN 1993-1-8:2005 (Design of Joints) kuvattuun komponenttimenetelmään, missä komponentti voi käyttäytyä eri tavoin, ja kutakin murtu-

mismuotoa vastaa tietty kestävyys. Edellä mainitun ohjeen komponenttimalli ottaa huomioon mahdolliset stabiiliteetti-ilmiöt ja materiaalin mahdollisen epälineaarisuuden.

Kuvan 6 liitoksen mitoittaminen tehdään kuitenkin normaalisti melko yksinkertaisella tavalla, missä otetaan yleensä huomioon pelkästään taivutusmomentti ja leikkausvoima. Se on täysin hyväksyttävää, mutta vaatii kokemusta suunnittelijaa. Mitoitusvaiheet on lueteltu taulukossa 4.

Kuvan 6 esimerkki osoittaa, että liitosten suunnittelu on erittäin vaativa tehtävä, mikäli pyritään optimoimaan kaikki liitoksen osat ja komponentit.

Yksittäisissä liitoksissa ei ole mielekäästä pyrkiä optimoimaan rakenteen osia!

Kuvan 6 mukaisessa jäykässä liitoksessa on runsaasti mahdollisuuksia optimoida, mutta siihen tarvitaan normaalisti jokin kaupallinen tietokoneohjelma, jolla lasketaan liitoksen eri rakenneosien hyväksikäyttöasteet, jolloin voidaan tehdä päätöksiä levyjen paksuuksista tai muista mahdollisista seikoista.

#### Taulukko 4. Pilari-palkki-liitoksen suunnittelun vaiheet.

	Vaiheen kuvaus
1	Valitaan sopiva palkin päätylevy, joka on suunnilleen palkin laipan paksuinen.
2	Valitaan kiinnitysruuvit palkin pään taivutusmomentin $M$ perusteella ruuvien mitoitusarvon ollessa yksinkertaisesti $M / nh$ [kN], missä $n$ on ruuvien lukumäärä ylälaipan ylä- ja alapuolella (yhteensä 4 kpl), ja $h$ on palkin korkeus [m]. Valitaan päätylevyn alareunaan samat ruuvit.
3	Valitaan jäykisteet suunnilleen samaa paksuutta kuin palkin laipat.
4	Tarkastetaan jäykisteiden hoikkeudet ja puristuskestävyydet.
5	Valitaan palkin päätylevyn kiinnityshitsit yksinkertaisimman ns. keskiarvomenetelmän (Eurocode 3) kaavojen perusteella, jolloin: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Täyden tunkeuman hitsejä (V ja K-hitsit) ei tarvitse mitoittaa.</li> <li>- Pienahitsin (katso tarkemmin kohdassa 5.3) tulee täyttää ehdot: <math display="block">F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}</math> missä <math>F_{w,Ed}</math> on hitsiin vaikuttava ulkoinen rasitus = <math>F / l</math> pituusyksikköä kohti ja <math>F_{w,Rd}</math> on hitsin vastaava kestävyuden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti.</li> </ul>
6	Jos liitoksessa vaikuttaa merkittävä leikkausvoima, tarkastetaan ruuvien ja uuman hitsausliitoksen leikkausvoimakestävyys.

Käytännössä, edellä taulukossa 4 kuvatulla yksinkertaisella tavalla ei käy selville:

- mikä on kyseisen liitostyyppin heikoin kohta, eli
- käyttäytykö liitos sitkeästi vai hauraasti.

Vaikka liitosten yksinkertainen mitoittaminen ei ehkä anna riittävästi tietoa liitoksen sitkeydestä, siitä voidaan kuitenkin huolehtia taulukossa 5 esitettyllä kvalitatiivisella menettelyllä. Kun erilaisten liitoskomponenttien toimintatapa tiedetään, voidaan liitoksesta helposti päätellä, mitkä ovat sen hauraasti käyttäytyvät komponentit. Tällöin liitoksen sitkeä toiminta varmistetaan sillä, että kohdistetaan erityishuomiota hauraasti käyttäytyviin komponentteihin ja varmistetaan, etteivät ne ole liitoksen heikoimmat kohdat.

**Taulukko 5.** Kuvan 6 liitoksen hauraasti käyttäytyvät komponentit ja niiden toiminta.

Komponentti	Vaurion kuvaus
Palkin päätylevyn hitsi ylälaippaan	Hitsi palkin ylälaippaan käyttäytyy hitsimateriaalin osalta sitkeästi, eli murtotilassa voima voi jakautua melko tasaisesti hitsiin. Hitsausliitoksen hitsityypistä riippuu käyttäytykö hitsausliitos hauraasti vai sitkeästi. Jos hitsaus on tehty käyttäen pienahitsejä, ja hitsin tunkeuma on pieni, hitsi saattaa murtua ylälaipan pinnan suuntaisena leikkauksena läheltä ylälaipan pintaa (kuva 8). Tällainen ilmiö tapahtuu hauraasti, koska hitsimateriaalista plastisoituu vain hyvin pieni tilavuus ja murtovenymä saavutetaan paikallisesti nopeasti. V- tai K-hitseillä kohta voidaan mahdollisesti muuttaa sitkeästi käyttäytyväksi.
Palkin alalaipan Puristuminen	Palkin alalaipan puristusmurto riippuu alalaipan hoikkuudesta, ja tapahtuu nopeasti, mikäli laipan puristuskestävyys saavutetaan laipan nurjahduksena. Puristuskestävyyttä voidaan tarvittaessa korottaa paksummalla laipalla, pystyjäykisteillä tai tukilevyllä.
Palkin ylälaipan Ruuviliitos	Liitoksen ruuvien suurin vetovoima kohdistuu ylimpään ruuviriviin, jonka ruuvit pitää valita siten, että niiden kierteisen osan vetokestävyys on suhteellisesti selvästi suurempi kuin liitoksen muiden osien kestävyys siksi, että vedetyt ruuvit ovat alttiina leikkautumaan kierteen pohjasta lähtien. Leikkautuminen voi tapahtua nopeasti ja varoitamatta, koska ruuvien varren plastisoituva tilavuus on äärimmäisen lyhyt. Yhden ruuvien pettäessä muut saavat kantaakseen sen kuormat.
Pilarin uuman ja Laipan hitsiliitos	Mikäli pilarin profiili on hitsattu, eikä pilarissa käytetä jäykisteitä uuman molemmin puolin, saattaa pilarin vedetty laippa repeytyä irti uumalevystä. Uumajäykisteet helpottavat tilannetta samoin kuin mahdollinen laipan tukilevy, joka pienentää laipan taipumista.
Pilarin uuma tai Uuman jäykiste	Palkin alalaipan kohtaan pilariin syntyy puristusta. Jos pilarissa ei käytetä jäykisteitä, uumalevy saattaa lommahtaa. Jos jäykisteitä käytetään, niiden hoikkuus pitää valita siten, että jäykisteen lommahdukskestävyys on suurempi kuin vastaava muiden kohtien murtokuorma.

### 3. PIENAHITSAUKSEN TOIMIVUUSEHDOT

Teräsrakenteiden hitsausliitosten suunnittelussa on vaurioselvityksissä havaittu paljon puutteita, ja mitoituksessa on myös tehty karkeita virheitä. Oheen on poimittu valokuvia ja esimerkkejä sekä vaurioituneista ja sortuneista rakennuskohteista että eräistä rakennekokeista, joilla on selvitelty liitosrakenteiden kestävyyttä ja vauriomuotoja.

Suurin osa esimerkeistä kohdistuu tavalla tai toisella teräsrakentamisessa yleiseen pienahitsaukseen. Mahdollisesti sen käyttökelpoisuudesta johtuu, että ne harvat tapaukset, milloin pienahitsausta ei voi käyttää, jäävät suunnittelijalta helposti huomiotta, eikä konepaja voi ilman työselitystä tehdä suunnitelmien vastaista päätöstä hitsata rakenteet muulla tavalla. Kohdassa 3.1 on käsitelty ehtoja pienahitsauksen käytölle ja toimivuudelle, ja kohdissa 3.2 - 3.5 on käsitelty erilaisia vaurio- ja testitapauksia, sekä sitä mikä niissä ehkä meni vikaan.

#### 3.1 Pienahitsien käytön ehdot

Teräsrakenneyhdistyksen (TRY) Internetissä ylläpitämässä, ja kaikkien suunnittelijoiden käytettävässä ESDEP koulutusaineistossa (on EU:n rahoituksella laadittu Eurocode 3:n koulutusmateriaali) on kohdassa 11.2.2, Hitsausliitosten mitoittaminen, annettu pienahitsaamiselle (**samat ehdot koskevat käytännössä myös muita railomuotoja!**) eräitä perusedellytyksiä:

Hitsien mitoitusta varten tehdään kolme perusoletusta:

- *Hitsit ovat homogeenisia ja isotrooppisia.*
- *Hitseillä liitettävät osat ovat jäykkiä ja niiden muodonmuutoksia ei oteta mitoituslaskelmissa huomioon.*
- *Vain ulkoisista kuormista aiheutuvia nimellisjännityksiä tarkastellaan. Jäännösjännityksien, jännityskeskittymien ja hitsien muototekijöiden vaikutusta ei oteta huomioon staattisessa mitoituksessa.*

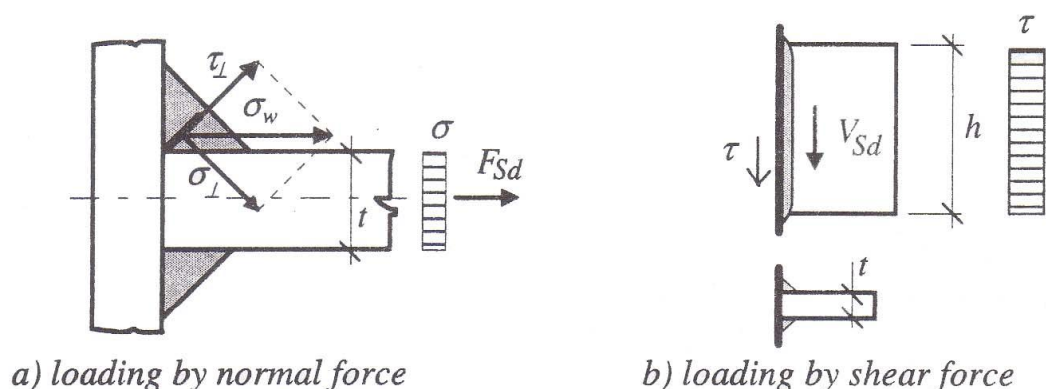
Edellä olevan mukaisesti hitsausliitoksessa vaikuttava voima jaetaan tarkasteluja varten komponentteihinsa /5/ hitsin pituusakselin suuntaan ( $\parallel$ ) ja sitä vastaan kohtisuoraan ( $\perp$ ) suuntaan sekä hitsin laskentapoikkipinnan suuntaan ja sitä vastaan kohtisuoraan suuntaan (kuva 7).

Vastaavat jännityskomponentit (SFS 2373 /5/) ovat:

$\sigma_{\perp} = F_{\sigma_{\perp}} / (al) = F_{Sd} / (al\sqrt{2})$  on normaali jännitys hitsin laskentapoikkipinnan tasossa,

$\tau_{\perp} = F_{\tau_{\perp}} / (al) = F_{Sd} / (al\sqrt{2})$  on leikkausjännitys hitsin laskentapoikkipinnan tasossa kohtisuoraan hitsin pituussuuntaa vastaan,

$\tau_{\parallel} = F_{\tau_{\parallel}} / (al) = V_{Sd} / (al)$  on leikkausjännitys hitsin laskentapoikkipinnan tasossa hitsin pituussuuntaan.



**Kuva 7.** Hitsausliitoksessa vaikuttavat voimat suunnitteluohjeissa.

Jännityskomponentti  $\sigma_{\parallel}$  on hitsin suuntainen normaalijännitys hitsin poikkileikkauksessa (eli kuvan 7 a normaalin suunnassa). Normaalijännitystä  $\sigma_{\parallel}$  ei oteta huomioon, koska tällä komponentilla on häviävän pieni vaikutus muihin komponentteihin verrattuna.

Standardin SFS 2373 tai vastaavien Eurokoodien mitoituskaavat pätevät hitsausliitoksissa kun edellä mainitut oletukset ovat voimassa. Käytännössä ne merkitsevät, että **hitseissä oletetaan vaikuttavan tasainen jännitys- ja muodonmuutostila koko hitsin pituudella (h).**

Mikäli jännitystila ei ole vakio, mitoituskaavoja voi käyttää hitsin kullekin poikkileikkaukselle erikseen, kunhan jännitystila on lineaarinen (kun poikkileikkaus säilyy tasona). Käytännössä poikkileikkaus hitsien tasossa säilyy tasomaisena, jos osien taivutusjäykkyydet liitoksen eri puolilla ovat suunnilleen samaa suuruusluokkaa, tai käytetään jäykisteitä (vrt. laippaliitokset).

Todellisuudessa jännityskeskittymät ja jäännösjännitykset voivat paikallisesti saavuttaa myötörajan. Materiaalin sitkeydestä johtuen hitsissä tapahtuu jännityksien uudelleenjakautumista materiaalin plastisoitumisen myötä. Uudelleenjakaantumista voi tapahtua myös hitsin ulkoisen kuorman vuoksi. Plastisuusteorian mukaan lopullinen jännitysjakautuma on edullisin, kun myötöraja saavutetaan koko hitsin pituudella /21/.

Hitsivirheiden määrää ja laatua on rajoitettu standardissa SFS 2373 /5/ siten, että hitsien virheiden ollessa standardin **SFS-EN 25817: Terästen kaarihitsaus. Hitsiluokat.** /11/ rajoissa, hitsi pystyy toimimaan (plastisoitumaan) koko pituudeltaan.

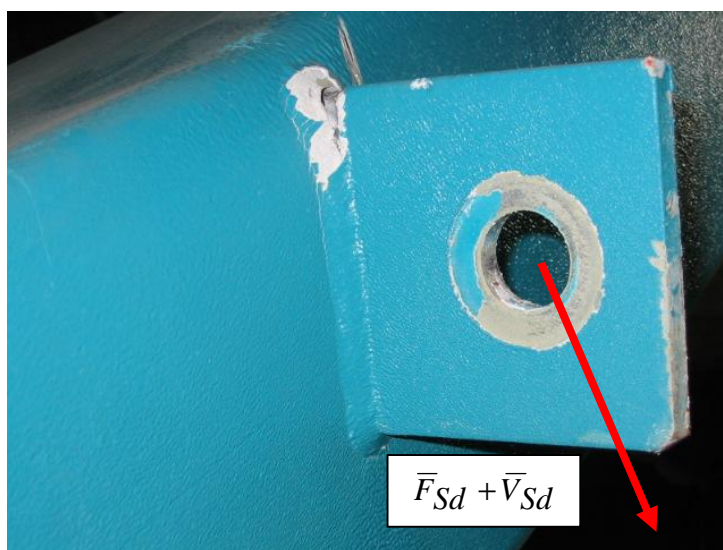
### 3.2 Esimerkki - Korvakkeen irtoaminen

Kuvan 8 esimerkkitapauksessa kuormitus koostuu kahdesta voimakomponentista: vetovoimasta  $F_{Sd}$  ja leikkausvoimasta  $V_{Sd}$ . Käytännössä rakenteiden liitoksissa saattaa kuitenkin vai-

kuttaa myös muita voimakomponentteja. Kuvassa 8 kiinnityskorvake on hitsattu ontton neliöputkiprofiilin kylkeen.

Kuten kuvasta 8 voi havaita, korvakkeen liitos on viety hyvin lähelle putkipalkin kulmaa, joka standardin SFS 2373 /5/ mukaan on kylmävalssatuilla putkilla muutosvyöhykettä, josta etäisyyden hitsiin pitää olla vähintään  $5s$  ( $s$  on rakenneputken levynpaksuus), ellei käytetä alumiinilla tiivistettyä terästä. Tässä tapauksessa hitsausliitoksen pahiten rasitettu hitsi on käytännössä muutosvyöhykkeellä.

**Huom!** Suomalaisten kylmämuovattujen putkipalkkiprofiilien materiaalina käytetään aina tiivistettyä terästä!



**Kuva 8.** Kiinnityskorvake putkipalkin kyljessä ja sen kuormitusresultantti.

Kuvan 8 mukaisen korvakkeen hitsaaminen putkipalkin kylkeen onnistuu hyvin, mikäli siihen vaikuttaa pelkkä pystykuorma eikä palotilanteesta tarvitse kantaa erityistä huolta. Parempi rakenneratkaisu kuin kuvassa saadaan aikaan jatkamalla korvaketta putkipalkin läpi.

Jos korvake liittyy putkipalkin kylkeen keskeisesti (pystyssä tai vaaka-asennossa), hitsien mitoittamiseen löytyy Ruukin Putkipalkkikäsikirjasta /23/ kaavat (katso myös liite 1). Mitoituskaavoja voi käyttää, mikäli niihin liittyvät muut mahdolliset lisäehdot toteutuvat riittävästi.

#### LIITOKSEN OMINAISUUKSISTA

Kun jokin kuormaa kantava rakenne liittyy korvakkeen avulla esimerkiksi hallin pääkannattajan osana olevaan rakenneputkeen, korvakkeen kautta saattaa käytännössä välittyä mm. seuraavia voimia ja rasituksia, jotka pitää ottaa huomioon korvakkeen kiinnityksessä:

- 1) korvakkeen yläpinnan (vaaka)suuntainen puristus- tai vetovoima  $F_{Sd}$ , jonka resultantti vaikuttaa korvakkeen reiän (tarkemmin kiinnitysruuvien) kohdalla (vrt. kuva 7a),

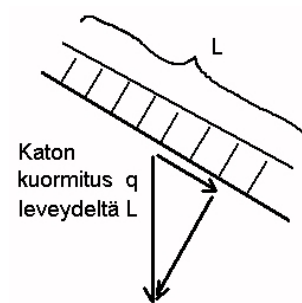
- mikäli voima  $F_{Sd}$  aiheutuu pääasiassa esimerkiksi rakennuksen pätyyn vaikuttavasta tuulikuormasta, se pitää voimassa olevien kuormitusmääräysten perusteella luokitella dynaamiseksi kuormitukseksi. Liitososien irtoaminen ja ruuvien löystyminen pitää esittää,
- 2) putkipalkkiin liittyvästä kantavasta palkista välittyvä ruuviliitoksen kautta (vaikuttaa korvakkeen reiän kohdalla) korvakkeeseen pystysuora voimakomponentti  $V_{Sd}$ , jonka suunta on suoraan alaspäin,
- jos kiinnityskorvake on asennettu pystysuoraan, pystyvoimakomponentti siirtyy sellaisenaan korvakkeen kiinnityshitseihin leikkausvoimaksi  $V_{Sd}$  (kts kuva 7b), ja
- 3) Leikkausvoimasta  $V_{Sd}$  aiheutuu korvakkeeseen myös sen liitoskohtaan taivutusmomentti, jonka suuruus on  $M_1 = V_{Sd} \cdot b$ , missä  $b$  on vaakasuora etäisyys reiän keskeltä hitsin painopisteeseen,
- taivutusmomentista  $M_1$  aiheutuu hitsiin epälineaarinen jännitysjakautuma. Jos putkipalkin seinämänpaksuus on pieni, taivutusmomentista voi aiheutua kuvan 8 mukaisia taipumia putkipalkin pinnassa ja täten kohdassa 2 esitetyt ehdot eivät ole voimassa,
  - jos korvake liittyy riittävän jäykkään kappaleeseen, kohdan 3.1 mitoituskaavoja voi soveltaa hitsin ylä- ja alapinnoissa (mikäli kahden hyvin erilaisen massan omaavan kappaleen liitoshitsaus onnistuu esimerkiksi menetelmäkokeen ansiosta),
- 4) Omasta painosta ja lumesta aiheutuu rakenteisiin pystykuorma. Jos rakennuksen katolla on kaltevuutta, kuorma voidaan tarvittaessa jakaa kahteen komponenttiin: katon normaalin suuntaiseen, ja katon pinnan suuntaiseen. Kumpikin komponentti pitää johtaa luotettavasti rakenneosilta toiselle ja perustuksille,
- mikäli kiinnityskorvake on pystysuorassa, olipa sen kiinnityskohta vaaka- tai viistossa suunnassa, sen hitsausliitokseen vaikuttaa vain edellä kuvatut voimat  $F_{Sd}$ ,  $V_{Sd}$  ja epäkeskeisyydestä aiheutuva taivutusmomentti  $M_1$ ,
  - mikäli korvake EI ole pystysuorassa, eikä kattoa ole kiinnitetty pääkannattajiin käyttäen muita kiinnikkeitä (vrt. kuva 9), korvakkeeseen vaikuttaa korvakkeen oman tason suuntainen leikkausvoimakomponentti  $V_{Sd}$ , ja pystykuormista aiheutuva korvakkeen pinnan normaalin suuntainen kuormituskomponentti, esim.  $Q_{Sd}$ , jonka resultantti vaikuttaa kuvassa 8 suunnilleen reiän kohdalla,
    - voimasta  $Q_{Sd}$  aiheutuu hitsausliitokseen jännityksiä korvakkeen paksuuden suunnassa, eikä kuvan 2 liitoksella ole siinä suunnassa vaikuttavaa riittävän pitkää (pituus vähintään 50 mm tai  $8s$  / SFS 2373) hitsiä,
    - voimasta  $Q_{Sd}$  aiheutuu hitsausliitokseen myös taivutusmomentti  $M_2 = Q_{Sd} \cdot b$ , joka aiheuttaa korvakkeen pienahitseihin vetoa, ja toisella puolella puristusta.

Kaikki edellä kuvatut voimasuureet ja niiden komponentit pitää ottaa huomioon kuvan 8 tyyppistä hitsausliitosta suunniteltaessa ja mitoitettaessa /15, 20/. Edellä olevista kohdista selviää, että kuvan 8 liitoksella ei viistolla katolla ole riittäviä ominaisuuksia vastaamaan kaikkia em. rasituksia, ja se on ollut yksi syy näkyvään vaurioon /14/.



**Kaltevien kattojen** osalta saattaa yleisesti olla tarpeen tarkastaa kuinka kattokuormat välitetään perustuksille. Tarve johtuu katteiden (ohutlevyt, villat, kate, yms.) kiinnitystavoista /14/.

Useimmat villojen kiinnitysmenetelmät on kehitetty tasakatoille tai katerakenteille, joihin kuormitus vaikuttaa kohtisuoraan pintaa vastaan. kaltevilla katoilla, jos viistous on esim. 20-40 astetta ja jänneväli on suuri, ja jos lumikuorma vaikuttaa katon lappeilla toispuoleisesti, tasapainotettava pinnan suuntainen kuormitusresultantti voi olla mittava, vaikka ei olisi käytetty lumen liukuesteit.

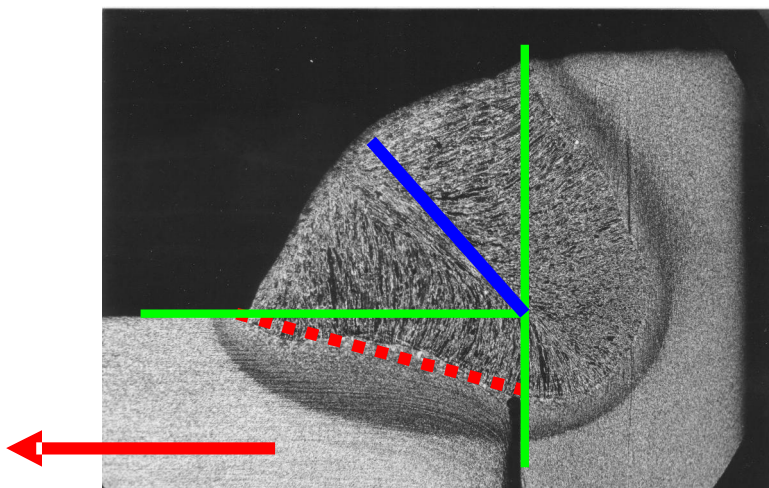


**Kuva 9.** Kattokuormitus.

Jos rakennuksessa on viistoja kattopintoja, suunnittelijan tulee selvittää katon pintarakenteiden luotettava ankkurointitapa katon pääkannattajiin (joissakin tapauksissa eristeen läpi).

### 3.3 Esimerkki - Hitsin leikkautuminen vetovoimasta

Pienahitseissä on erilaisia hitsausvirheiden mahdollisuuksia, eikä hitsien ainetta rikkomaton testaus ole aina mahdollista, minkä takia kuormaa kantavissa liitoksissa kannattaa ehkä käyttää läpihitsaamista pienahitsauksen sijasta. Kuvassa 10 on tyypillinen vedetyn kappaleen T-liitoksessa käytetyn pienahitsin leikkautumispinta merkitty punaisella katkoviivalla (lyhin leikkautumismatka, liitokseen vaikuttava vetovoima on merkitty punaisella nuolella).



**Kuva 10.** Punaisella katkoviivalla piirretty pienahitsin yksi mahdollinen leikkautumispinta (kohtuullinen tunkeuma, pienahitsin nimellinen a-mitta on piirretty sinisellä viivalla).

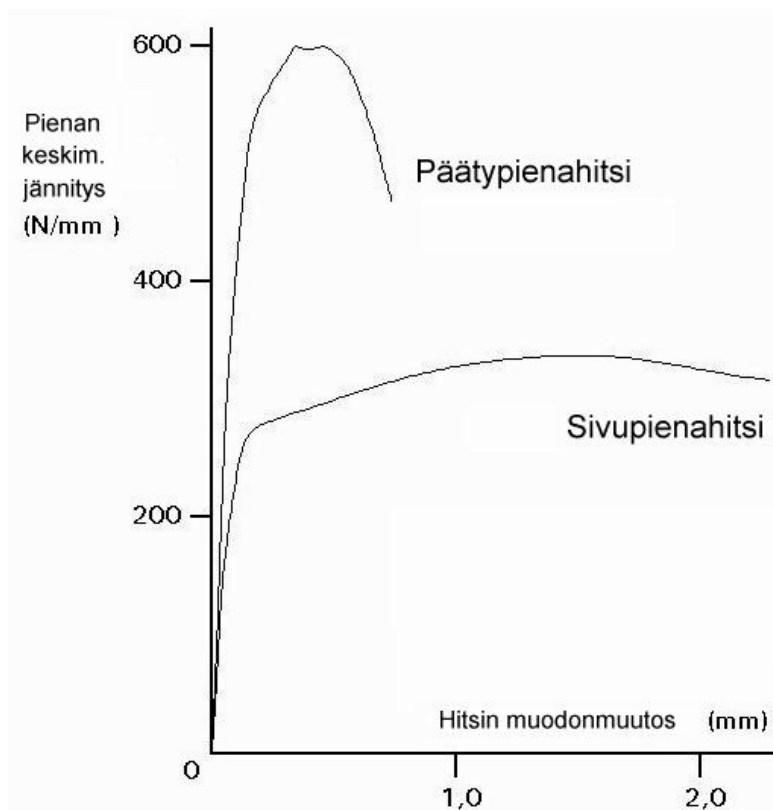
Kuvan 10 leikkautuminen johtuu siitä, että tiettyä hitsin pituutta  $L$  ja pinta-alaa  $A$  vastaava leikkauskestävyys on pienempi kuin samaa pituutta ja pinta-alaa vastaava vetokestävyys. Jos hitsiin vaikuttavaa vetovoimaa ei voida välttää, kuvan 10 mukaisen päätypienahitsin alttiutta

leikkautumiselle voidaan vähentää hitsaamalla siihen tietoisesti isompi tunkeuma raon suunnassa. Tällöin hitsin tehollinen a-mitta kasvaa, ja leikkauspinta siirtyy viistommaksi, ja riski leikkautumiselle vähenee. Tunkeuma saattaa oleellisesti pienentää rakenteen vaurioitumisriskiä, vaikka sitä ei muuten olisikaan tarkoitus käyttää mitoituksessa hyväksi. Toinen mahdollisuus on käyttää varsinaisia tunkeumahitsejä (V- tai K-hitsejä), jolloin hitsiä varten tehdään liittyvään kappaleeseen railo, ja hitsille tulee tietty hallittu tunkeuma, joka osaltaan lisää pinta-alaa, mihin vetojännitykset kohdistuvat (vaatii yleensä menetelmäkokeen).

Kuvan 10 hitsissä, vetovoimasta aiheutuu leikkausjännitystila punaista katkoviivaa vastaavaan leikkauspintaan. Jos leikkauksessa jossakin kohdassa saavutetaan myötöraja, ei veto-voimalla ole mitään mahdollisuuksia siirtyä muualle. Jos voimaa ei poisteta, hitsin toimiva poikkileikkaus pienenee, ja jäljellä oleva toimiva osuus joutuu kantamaan myötöön joutuneen pinnan osan lisäkuormat. Myötöraja-alue laajenee ja tehollinen pinta-ala pienenee edelleen, ja lopulta tapahtuu liitoksen leikkautuminen katkoviivaa pitkin. Liitoksessa plastisoituu mitättömän ohut kaistale katkoviivan molemmiin puolin, mikä merkitsee sitä, että rakenteen plastinen muodonmuutos ei vaadi paljon energiaa, ja sortuminen voi tapahtua nopeasti.



**Kuva 11.** Sivupienahitsi (kylkipienahitsi), ja päätypienahitsi (otsapienahitsi).



**Kuva 12.** Pääty- ja sivupienahitsin toimivuuksien ero. Sivupienahitsi käyttäytyy sitkeästi..

Kuvan 11 pienahitseistä tiedetään kokeiden perusteella, että päätypienahitsi on samankokoisista yhtä pitkistä sivupiena- ja päätypienahitseistä lujempi.

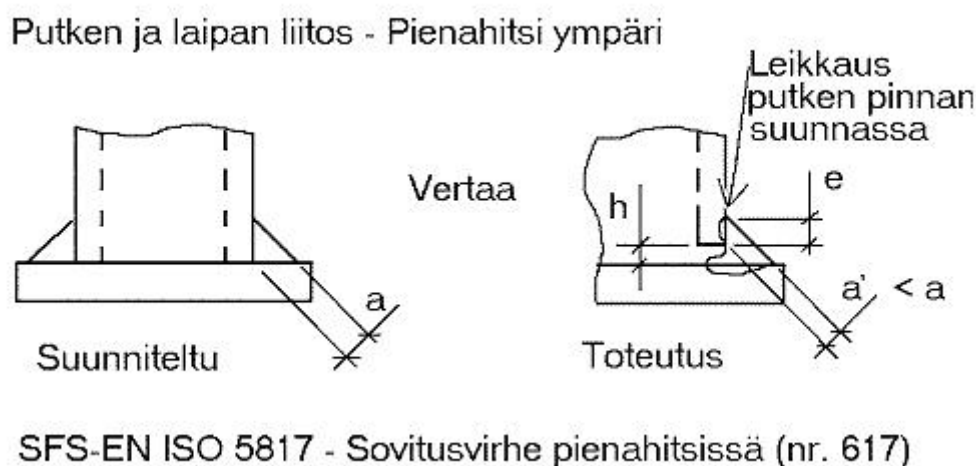
Hitsien sitkeys on kuitenkin vähintään yhtä tärkeä ominaisuus, mistä syystä yhtä lujissa sivupiena- tai päätypienahitseissä pitää samanaikaisen plastisoitumisen takia olla eri suuri  $a$ -mitta. Sivupienaahitsien sitkeys on selvästi parempi, ja niissä materiaali plastisoituu tasaisesti koko poikkileikkaukseltaan ja koko pituudeltaan, kunnes saavutetaan murtolujuus. Päätypienahitseissä plastisoituva tilavuus on hitsin pituudella paljon ohuemman kaistaleen ominaisuus (vrt. kuvan 10 punainen katkoviiva). Absoluuttinen murtoa vastaava muodonmuutos on niissä huomattavasti pienempi. Siksi päätypienahitsit käyttäytyvät ao. kuvan 12 mukaisesti hauraasti, eikä niissä ole kuorma-siirtymä-käyrässä havaittavissa merkittävää plastisoitumiskäyttäytymistä (vaakasuoraa osaa) vaan ne menettävät nopeasti kantavuutensa.

Kuvien 10, 11 ja 12 perusteella voidaan todeta, että hitsimateriaalin sitkeydellä ei ole suoraa suhdetta tai vaikutusta liitosrakenteen sitkeyteen. Täten hitsin lisäaineen valinnalla ei voida vaikuttaa merkittävästi rakenteen huonosta suunnittelusta aiheutuviin riskeihin.

### 3.4 Esimerkki - Hitsausliitosten virhealttius

Laippaliitoksiin sisältyy sovituserheen mahdollisuus. Kuvan 13 tapauksessa pienahitsin  $a$ -mitta mitataan kappaleiden ideaalisen aseman (vasen kuva) perusteella  $/11/$ . Jos rakenneputken ja laippalevyn väliin jää esim. valmistuserheen takia rako ( $h$ ), se pitää kompensoida ulkoisessa  $a$ -mitassa, jolloin pienahitsin todelliseksi  $a$ -mitaksi tulee  $a' = a$ .

Pääsääntöisesti, pienahitsin todellista  $a$ -mittaa ei voi selvittää millään aineita rikkomattomalla (NDT) tutkimusmenetelmällä sen jälkeen kun hitsi on valmis!



**Kuva 13.** Eräs vaurioselvityksissä esille tullut hitsausvirhe, missä  $a$ -mitta on liian pieni eikä virhettä voida todeta jälkikäteen NDT-menetelmillä tai silmämääräisesti.

Kuvan 13 tapausta voidaan myös arvioida kyseisen standardin antamista raon  $h$  raja-arvoista käsin. Hitsiluokassa C, jota sovelletaan teräsrakentamisessa, raon  $h$  suurin arvo on joko enin-

tään 3 mm, tai  $\leq 0,5 \text{ mm} + 0,2a$ . Kuvan 13 esittämä merkittävä ongelma on se, että mikäli rakoa ei ole kompensoitu ulkopuolisessa a-mitassa, todellinen a-mitta = a' saattaa jäädä huomattavan pieneksi, koska se pitää mitata putken ulkokulmasta.

Jos pienahitsin a-mitta on esimerkiksi 6 mm, rakenteen valmistuksessa suurin sallittu h on  $h = 0,2 \cdot 6 + 0,5 = 1,7 \text{ mm}$ . Jos rakenteeseen on valmistuksen aikana jäänyt tällainen rako (esimerkiksi leikkausreunan epätasaisuuden takia), eikä sitä kompensoida tietoisesti ulkoisessa a-mitassa, rakenteen todelliseksi laskennalliseksi a-mitaksi (= a'),

kun  $e = a\sqrt{2} - h = 6\sqrt{2} - 1,7 = 6,785 \text{ mm}$ , saadaan  $a' = e/\sqrt{2} = 4,798 \text{ mm}$ .

Hitsausliitoksen kestävyys vähenee tällaisen näkymättömiin (ei voi jälkikäteen todeta NDT-menetelmillä) jäävän sovitusrakkeen johdosta jopa  $100 \cdot (6 - 4,798) / 6 = 120,2 / 6 = 20 \%$ !

Suunnitelmien riittävyys hitsaustyön suorittamiseksi varmistetaan sopimus- ja suunnittelukatselmuksessa. Ulkopuolisen tarkastuksen tarve pitää arvioida erikseen.

Ohjeiden B7 (kohta 1.3.2) mukaan hitsien hyväksikäyttöaste tulee esittää teräsrakennesuunnittelijan hyväksymissä piirustuksissa tai projektieritelmässä niistä hitseistä, joissa se ylittää arvon 0,5 /17/.

Laadunvarmistuksesta, ja siihen liittyvistä ohjeista on valmistunut uusi Teräsnormikortti N:o 18/2005 /17/. Normikortissa ja ohjeissa korostetaan hitsaajan pätevyyttä sekä hitsaustyön suunnittelua, toteutusta ja koordinoitua, jotka rakenneluokkiin 1 ja 2 kuuluvissa rakenteissa tulee suorittaa työhön ja olosuhteisiin soveltuvan hyväksytyyn hitsausohjeeseen (WPS) mukaan.

Standardi SFS 2373 /5/ velvoittaa rakennesuunnittelijan ja valmistavan konepajan yhteistyöhön. Edellä kuvattu hitsausvirhemahdollisuus voidaan välttää esimerkiksi jos suunnittelija työselityksessä luettelee tärkeät kuormaa kantavat ja voimaa siirtävät pienahitsit, ja suunnitelmien riittävyys varmennetaan suunnittelukatselmuksessa /17/.

### 3.5 Esimerkki - Matalapalkkiliitokset

Suomessa on yleisesti käytössä erityyppisiä matalapalkkeja, joista osa toimii liittorakenteena betonilaatan kanssa. Matalapalkit liitetään neliö- tai suorakaideputkipilareihin tyypillisesti konsoliliitoksen avulla /7/. Konsoliliitostyyppinä on useita erilaisia, ja niille löytyy mitoituskaavat kirjallisuudesta tai TRY:n Internet-sivuilta. Pilarit voivat olla betonitäytteisiä tai onttoja. Myös useita muita liitostyyppinä käytetään, mutta rakenneputkien liitokset muihin rakenteisiin ovat yleensä joko työläisiä tai kalliita tai molempia.

Kuvassa 14 on esitetty eräs suosittu 2-tappinen konsoliliitostyyppi mitoituskaavoissa käytettyine merkintöineen. Kyseistä tyyppiä ei enää paljon käytetä, mutta se esiintyy kirjallisuudessa ja sille on olemassa yksinkertaistetut mitoituskaavat, jotka vastaavat kuvan 14 merkintöjä ja soveltuvat normaalitapauksiin, kun sovellettu rakenne, sen mittasuhteet ja itse liitos ovat ennestään tuttuja ja käytännössä testattuja.

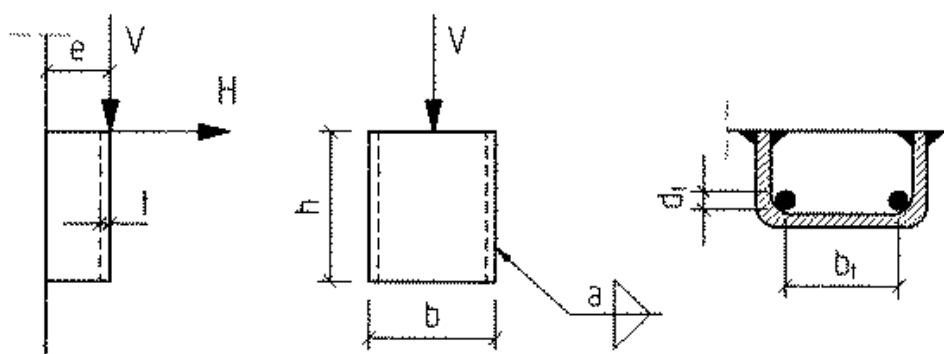
## KONSOLILIITOKSEN TARKEMPI MITOITUSMENETTELY

Kuvasta 14 voi havaita, että liitosrakenteen yksinkertaistetussa mitoitusmenettelyssä konsoliin oletetaan vaikuttavan vain palkista tulevat kuormitukset  $V$  (pystykuorma) ja  $H$  (aksiaalivoima), koska palkki lepää ylälaipallaan konsolin varassa. Konsolin alareunaan ei katsota aiheutuvan puristusvoimia palkin taivutuksesta. **Kuvan 14 konsoliliitoksen oletetaan toimivan nivelellisesti!** Rakenteen nivelliitos tulee valmistaa siten, että nivelominaisuus säilyy.

Voimille  $V$  ja  $H$  on konsoli ja siihen liittyvät komponentit ja hitsit syytä mitoittaa varman päälle, koska yksinkertaistettu mitoitusmenettely ei ota huomioon kaikkia mahdollisia rasituksia tai kuormituksia. Erityisesti reunapalkkien konsoleihin vaikuttaa vääntörasituksia.

U-profiilista tehty konsoli hitsataan pienahitsaamalla muuhun rakenteeseen. Konsolin sisään kiinnitettävät tapit asettuvat asennettaessa palkin ylälaipassa oleviin reikiin, ja ne kiinnitetään palkkiin yleensä asennushitsein, joiden merkintä on kokoonpanopiirustuksessa. Tappien reiissä ei saa olla isoja välyksiä, jotta palkin taipumisesta ja/tai aksiaalivoimasta aiheutuvan veto- tai puristusvoiman  $H$  voidaan katsoa siirtyvän muut tietä kuin asennushitsin kautta.

Käytännössä kuvien 14 ja 15 mukainen konsoliliitos, jonka on määrä toimia nivelliitoksena, voi valmistuttuaan toimia hyvin tai huonosti riippuen siitä kuinka välipohjat valmistetaan. Jos valmistamista ja asennusta koskevat ohjeet ovat vajavaisia, tai valmistuksen laadunvalvonta on puutteellista, palkin ja konsolin välyys saattaa betonivalujen vaikutuksesta sulkeutua, jolloin konsoliin voi vaikuttaa taivutusmomentti, jolle sitä ei ole mitoitettu. Ongelmaa korostaa, että normaalisti piiloon jääviin liitoksiin tai niiden osiin ei voi kohdistaa kunnossapitotoimia.



**Kuva 14.** Suunnitteluohjeista (suosituksista) löytynyt matalapalkin päätä tukevan konsoliliitoksen yksinkertaistettu laskentaohje ja siihen liittyvät parametrit.

Tarkennettuun konsolin mitoitusohjeeseen pitää kuulua ainakin seuraavat tarkastelut:

- 1) konsolin etupinnan ja sivupintojen leikkausvoimakestävyydet,
- 2) leikkaustappien ja hitsausliitosten leikkausvoimakestävyydet,
- 3) palkin ylälaipan taivutus-, leikkaus- ja reunarepeytymiskestävyydet,
- 4) pilarin liitospinnan taivutus- ja lävistymiskestävyydet ja muodonmuutokset,

- 5) pilarin uuman leikkauskestävyydet
- 6) mihin konsoli aiotaan tai voidaan liittää (vrt. kuva 15),
- 7) konsolin hitsausliitoksen merkinnät pitää täydentää:

Kuvan 14 hitsimerkintä tarkoittaa "pienahitsi molemmin puolin". Sama merkintä tarvitaan konsolin kummallekin reunalle, koska hitsejä ei voi tehdä yhdellä poltolla. Lisäksi, ilman oikeanpuoleista leikkauskuvaa hitsimerkintä voidaan tulkita koskevan

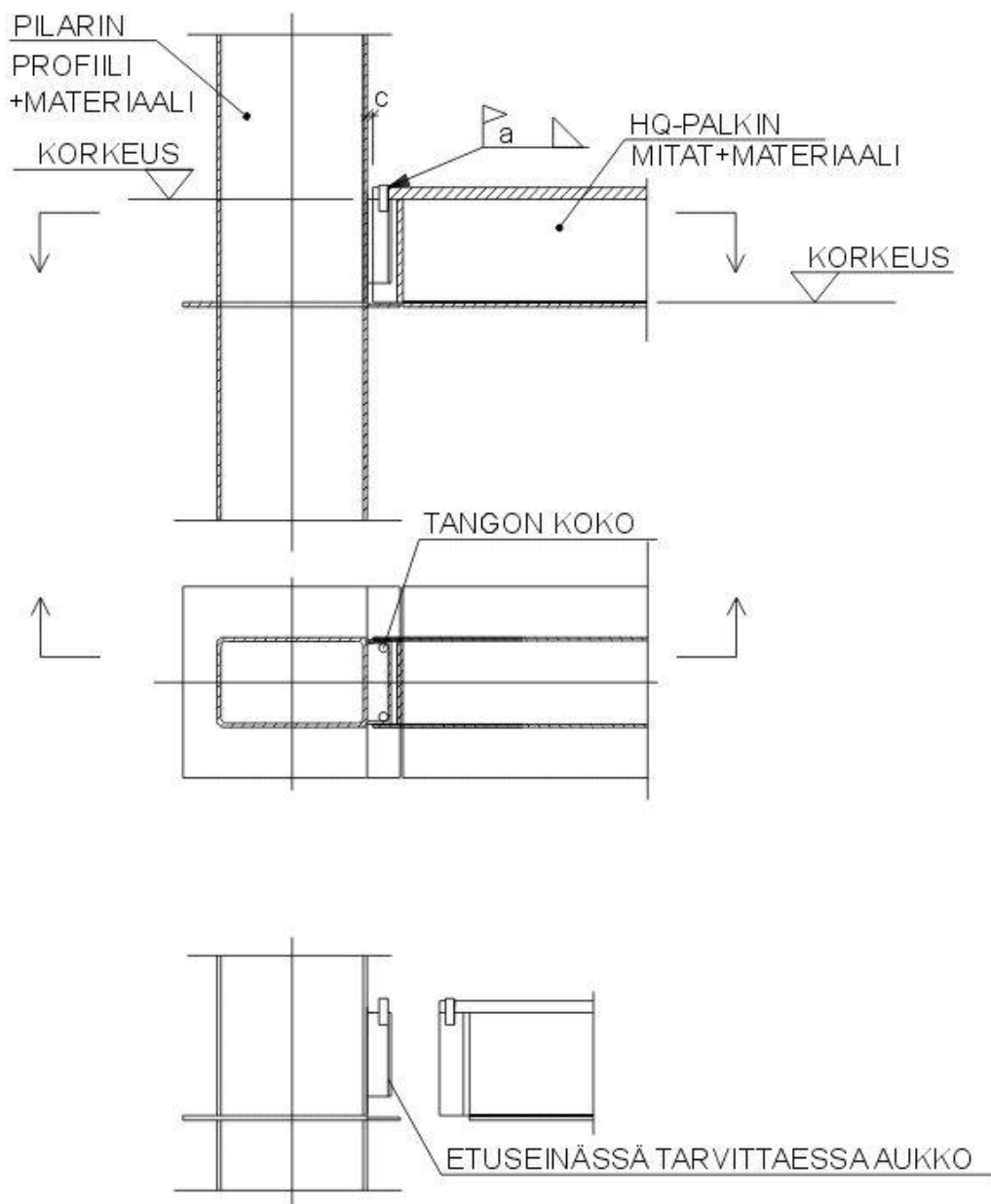
- a) vain U-profiilin oikeanpuoleista reunan ulko- ja sisäpuolta, tai
  - b) U-profiilin oikean ja vasemman laidan ulkopuolisia hitsejä, tai
  - c) 2-puolisia hitsejä oikeanpuoleisimman kuvan esittämällä tavalla.
- 8) Kuviin 14-15 pitää lisätä konsolin sisäpuolelle liitettävien tappien liitoshitsien merkintä, paitsi jos konsolista laaditaan oma erillinen valmistuspiirustus.

Kerrospalkin kiinnittämiseen tarvittavat liitostapit pitää kiinnittää hitsaamalla konsolin sisälle. Tappeihin vaikuttaa erityisesti vetovoima H (katkaisu!), mutta myös muita rasituk-  
sia, mikäli liitos valmistusta ei valvota riittävästi.

- 9) Ohje matalapalkin liittämiseksi pilariin kuvan 14 tyyppisen konsolin avulla pitää täydentää palkin ankkurointia koskevalla ohjeella. Kiinnitykset pitää varmistaa esimerkiksi siten, kuin on annettu ohjeeksi Eurocode 4:n palomitoitusta koskevassa osassa. Liitettäessä matala- tai muu palkki putkipilariin tai betonitäytteiseen putkipilariin, pitää vaakakiinnityksen lisäksi olla joko
  - a) palkin alapuolinen tuenta, jolloin palkki ei kiinnityksen myödetessä heti sorru, tai
  - b) kiinnitysten pitää lävistää pilari, jolloin kiinnitykseen tarkoitetun laipan mahdollinen vaurio ei riko putkipilarin pintaa tai kiinnityshitsejä.

Vauriotapauksista on voitu havaita, että suunnitteludokumenteissa on viitattu tyyppidetalleihin, käyttöselosteisiin ja standardeihin vaikka kyseiset dokumentit eivät ehkä kata asianomaista tilannetta. Tällaisten täydentävien piirustusmerkintöjen puuttuminen merkitsee yleensä vastaavien suunnitelmien tai mitoituslaskelmien puuttumista, mikä osaltaan altistaa rakennevaurioihin ja -sortumiin.

Esimerkiksi, konsolin liittäminen äärettömän jäykkään seinään on hitsausliitosten mitoitusohjeiden mukaan mahdollista, koska tällöin pienahitsauksen toimivuusehdot toteutuvat riittävästi. Mikäli liittäminen tapahtuu esimerkiksi putkiprofiiliin, tarvitaan liitoksen toimivuuden varmistamiseksi jonkinlainen ankkurointi tai muu lisäkiinnitys pilariin, jotta pystyvoimasta  $V$  aiheutuva taivutusmomentti  $V \cdot e$  ei revi konsolia irti pilarista (kuva 17).



**Kuva 15.** Matalapalkin liittäminen onttoon suorakaideputkipilariin.

Kuvassa 17 on testattu kuvan 15 mukaista pilari-palkki-liitosta. Liitoskappaleita testattiin kaksi sarjaa, joiden koekappaleet teetettiin konsolin hitsimerkintöjen osalta samoilla kuvan 14 mukaisilla hitsausmerkinnöillä. Toisessa koesarjassa hitsaus oli tehty vain konsolin ulkopuolelle. Toisessa koesarjassa hitsaus pilariin oli tehty kuvan 14 detaljin mukaisesti.

Mikäli rakenne, mihin konsoli kiinnitetään, on kovin massiivinen tai ko. levyt ovat paksuja verrattuna konsolin levynpaksuuteen, ne saattavat vaatia runsaasti lämmitysenergiaa, ja on olemassa vaara, ettei hitsiaine tartu lainkaan ko. riittämättömästi lämmenneeseen tai sulamatta jääneeseen pintaan (kuva 16). Massaltaan hyvin erilaisten kappaleiden hitsaaminen kiinni toisiinsa on suunnitteluvirhe, mikäli hitsauksen onnistumista ei varmisteta esimerkiksi työkohtaisella menetelmäkokeella.



**Kuva 16.** Konsolin hitsin riittämätön kiinnitys ja tunkeuma putkipilarin ulkopintaan.



**Kuva 17.** Teräs ja leikkausrasitus. Konsolin irtoaminen pilarista taivutusmomentin vaikutuksesta, kun konsoli on liitetty ankkuroimatta putkiprofiilin kylmämuokkauksen vaikutusalueelle, ja palkin alapaarteen ja konsolin välitys on liian pieni /7/.

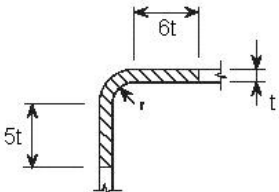


Betonitäytteen pilarin valu tai välipohjalaatan pinnan valu saattaa täyttää konsolin ja välykset, jolloin palkin päähän syntyvä taivutusmomentti voi vähitellen irrottaa konsolin pilarista.

Hitsaaminen kylmämuovattujen putkiprofiilien kylmämuovatuille alueille aiheuttaa aina tarpeen tarkastella tilannetta kriittisesti, koska kylmämuovaus heikentää putken materiaalia.

**Taulukko 6.** Ehdot hitsaamiselle putkiprofiilin kylmämuovatuille alueelle.

r/t	Kylmämuokkauksesta aiheutuva venymä (%)	Suurin sallittu paksuus (mm)		
		Yleensä		Täysin tiivistetty teräs Alumiinilla tiivistetty teräs (Al ≥ 0.02 %)
		Pääasiassa staattinen kuormitus	Kun väsyminen on määräävä	
≥ 25	≤ 2	Kaikki	kaikki	Kaikki
≥ 10	≤ 5	kaikki	16	kaikki
≥ 3,0	≤ 14	24	12	24
≥ 2,0	≤ 20	12	10	12
≥ 1,5	≤ 25	8	8	10
≥ 1,0	≤ 33	4	4	6



Kylmämuovatuille alueelle tai 5t:n etäisyydellä sen molemmin puolin, ks. taulukko 6, saa hitsata, jos vähintään toinen seuraavista ehdoista on voimassa:

- kylmämuovatuut alueet normalisoidaan kylmämuokkauksen jälkeen, mutta ennen hitsausta;
- r/t-arvo täyttää edellä olevassa taulukossa esitetyt kyseeseen tulevat vaatimukset.

Monissa tapauksissa, kun hitsausliitoksissa on ollut ongelmia, jokin rakenteen yksityiskohta on suunnittelussa muotoiltu sellaiseksi, että siihen muodostuu jännityshuippu, eikä rakenne ole voiman vaikuttaessa tai kasvaessa kyennyt vastaanottamaan muodonmuutosenergiaa. Erityisesti liitosten alueella ei normaalisti ole tilaa näkyville muodonmuutoksille!

Rakenteiden huonosti muotoilluissa yksityiskohdissa muodonmuutokset ja jännitykset saattavat keskittyä yhteen tiettyyn kohtaan, missä liitokseen syntyy vähitellen suureneva vaurio kuormaa kantavan tehollisen poikkileikkauksen pienentyessä (esimerkiksi kuva 17, missä palkin alapaarten ja konsolin välyys on ollut pieni, jolloin palkin päähän alkaa muodostua taivutusmomenttia, mille sitä ei ole mitoitettu).

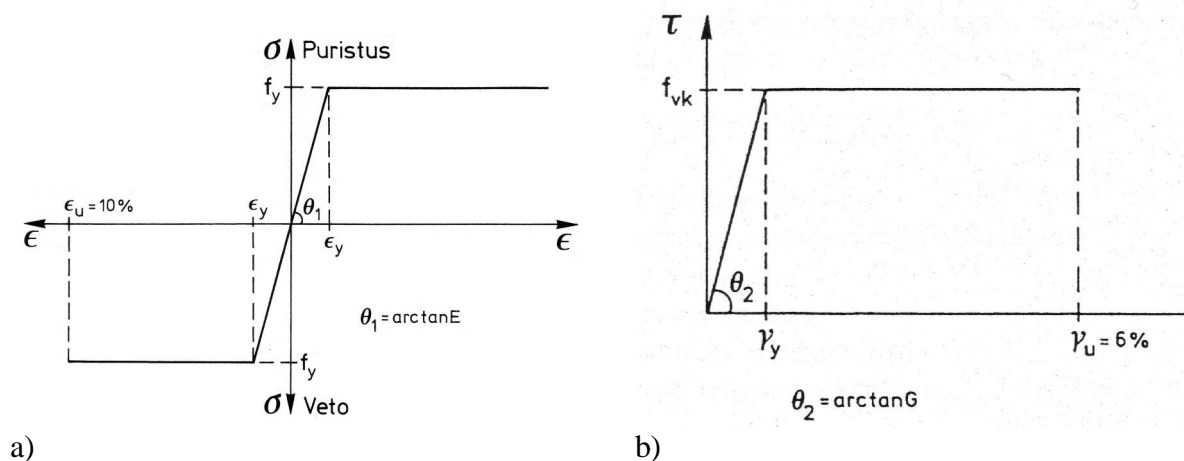
### 3.6 Esimerkki - sitkeät ja hauraat rakenneosat

Hitsaus- ja muiden liitosten yksityiskohtien suunnittelussa suunnittelijan tulee ymmärtää materiaalin käyttäytymistä (kuva 18). Teräksen osalta suunnitteluohjeissa on riittävät materiaali-tiedot. Suunnitteluohjeissa todetaan, että teräs on käyttötilassa riittävän lineaarinen materiaali, mutta voi ennen murtumista saavuttaa myötörajan. Tällaisessa tilanteessa hyvin suunnitel-lut rakenteet hyödyntävät teräksen plastisoitumisominaisuudet eivätkä sorru.

Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet B6 /14/, B7 /1/ ja EC3 /2/ perustuvat rakenneosien plasti-seen kestävyys, ja poikkileikkauksien ja profiilien luokitteluun, missä rakenneluokkaan 1 ja 2 kuuluvat sellaiset, joihin voi muodostua plastinen nivel (samanlainen luokittelu koskee liitoksia). Muihin rakenneluokkiin kuuluvat osat pitää mitoittaa joko kimmoisena tms.



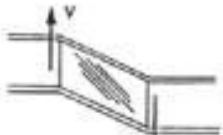
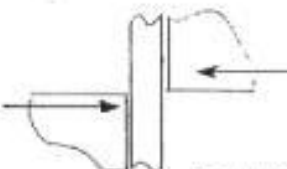

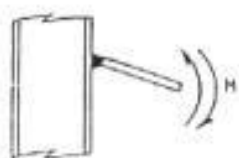

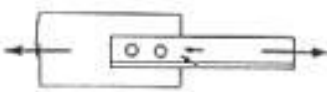

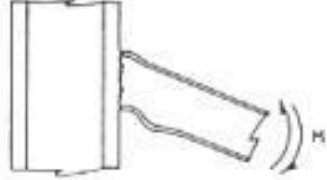
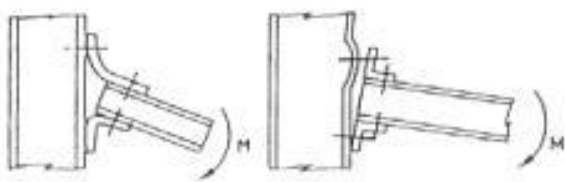
Teräsrakenteiden sortuminen tai vaurioituminen voi tapahtua joko sitkeästi tai hauraasti. Hau-raalla toiminnalla tarkoitetaan sellaista rakenteen käyttäytymistä, missä vaurioituminen tai sortuminen tapahtuu äkillisesti ilman erityisen selviä varoituksia tai merkkejä tulevasta pian sen jälkeen kun rakenteen jossakin osassa saavutetaan myötöraja tai rakenteen osan kestävyys (kuva 18) tai rakenne menettää stabiilitettinsä (lommahtaa, nurjahtaa).

Teräksen murtovenymä  $\Delta L / L$  on noin 10 % sen **venyvästä pituudesta L**. Rakenneosan ve-nyvä pituus saattaa joissakin komponenteissa olla lyhyt, kuten esimerkiksi vedetyissä ruu-veissa, missä se voi olla paljon pienempi kuin yksi ruuvien kierteen korkeus. Tällöin teräs saattaa murtua hyvin nopeasti, vaikka murtuma olisikin metalliopillisesti sitkeä, koska jänni-tykset ja venymät keskittyvät hyvin pienelle alalle ja pieneen ainetilavuuteen. Jos rakenne ei pysty ottamaan vastaan kuin vain vähän muodonmuutosenergiaa, se on altis vaurioille.



**Kuva 18.** Teräksen käyttäytymismallit a) veto/puristusvoiman, ja b) leikkausvoiman vaikut-taessa /1/.

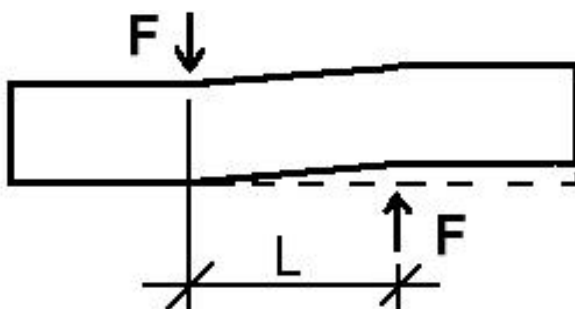
Hitsausliitosten suunnitteluohjeiden /5, 27/ mukaan pitää staattisesti epämääräisten rakenne-liitosten, joihin sisältyy useita erisuuntaisia hitsejä, hitsit pitää mitoittaa siten, että niillä on riittävä muodonmuutoskyky. Eurokoodin osalta se tarkoittaa, että hitsin kestävyys mitoitetaan siten, että sen kestävyys on vähintään 80 % heikomman liittyvän levyn kestävyydestä.

SITKEÄSTI KÄYTTÄYTYVÄT	HAURAASTI KÄYTTÄYTYVÄT
 <p>Veto/puristusmyötö</p>	 <p>Pultin vaurio.</p>
 <p>Leikkausmyötö</p>	 <p>"Katkaisu"</p>
 <p>Taivutusmyötö</p>	 <p>Isot vaihtuvat muodonmuutokset hitseissä.</p>
 <p>Pultin reiän reunapuristus.</p>	 <p>Isot paikalliset vaihtuvat muodonmuutokset.</p>
 <p>Liukuminen ja kitka.</p>	 <p>Paikallinen lommahdus.</p>
 <p>- Taivutus/leikkaus liitososassa - Pilarin laipan muodonmuutos.</p>	

**Kuva 19.** Sitkeästi / hauraasti käyttäytyviä yksityiskohtia (Plumier).

Leikkaus tapahtuu normaalisti sitkeästi. Kuitenkin jos leikkausvoimaa aiheuttavan voimaparin  $F$  välinen etäisyys  $L$  (kuva 20) on hyvin pieni, liukumaa saava materiaalitilavuus on hyvin pieni, ja murtuminen tapahtuu melko pienellä muodonmuutosenergialla. Mikäli etäisyys  $L$  edelleen lähestyy nollaa, puhutaan leikkauksen sijasta "katkaisusta", koska voimaparin välillä ei käytännössä enää ole plastisoituvaa aineilavuutta. Tunnetusti jopa teräksen katkaisu voi tapahtua melko pienellä voimalla  $F$ , koska jännitykset keskittyvät kapeaan siivuun.

Jos teräslevyyn tai tappiin vaikuttaa poikittainen voimapari (etäisyys  $L$ , kuva 20), voimaparin  $F$  välille aiheutuu levyyn tai tappiin leikkausvoima  $Q = F$ , mistä aiheutuu liukumoduulin  $G$  määräämä liukuma ja liukukulma  $\gamma_{yz} = \tau_{yz} / G$ , jonka murtumisraja-arvo  $\gamma_u$  (kuvassa 18) saavutetaan 6 % kohdalla. Vaikka pituus  $L$  on hyvin pieni (kuten tapit ja ruuvit), suunnitteluohjeissa puhutaan leikkausrasituksesta, vaikka ns. leikkausliukumista ei erityisemmin tapahdu.



**Kuva 20.** Voimaparin aiheuttama leikkausrasitus on "katkaisu", kun  $L$  lähenee nollaa  $\rightarrow 0$ .

Kuvan 20 tyyppinen katkaisutilanne (kun  $L \rightarrow 0$ ) tai jokin sen variaatio on esiintynyt monissa viime vuosina tapahtuneissa hitsausliitosten vaurioissa ja onnettomuuksissa. Vastaavien tapausten välttämiseksi tulee ymmärtää, että hitseissä tai liitosten muissakaan osissa ei saa esiintyä huonosti energiaa absorboivia rakenneosia, joiden muodonmuutoskyky on olematon. Vaihtoehtoisesti ne pitää suunnitella oleellisesti muita osia vahvemmiksi (ns. avainelementit), jolloin liitoksen heikoin lenkki on jokin muu sitkeämpi rakennekomponentti.

Monimutkaisemmissa rakenteissa ja tapauksissa, kuten rakenne-elementeissä ja rakenteiden liitoksissa on yleensä monia komponentteja, jotka voivat yhden kohdan myödetessä ottaa vastaan lisäkuormaa. Siksi voima-siirtymä- tai momentti-kiertymä-käyttäytyminen on niissä yleensä kuvan 12 mukaista sitkeää tyyppiä, kuten sivupienahitseillä.

Sitkeällä rakenteella on kyky säilyttää saavutettu kuormitustasonsa, vaikka jossakin kohdassa saavutetaan myötöraja eli rakenteen kestävyys. Se antaa sopivasti turvallisuusmarginaalia mahdollisia suunnittelu- tai valmistusvirheitä tai materiaalivikoja vastaan. Rakenteiden hauraasti käyttäytyvät osat tai yksityiskohdat altistavat sortumille (vrt. kuva 19).

Rakenteen äkillinen vaurioituminen tai sortuminen hyötykuormien ollessa vaadittujen mitoitusarvojen alapuolella, on merkki rakenteen tai sen osan hauraasta toiminnasta. Käytännössä se on merkki erittäin huonosta tai jopa virheellisestä suunnittelusta.

## Sitkeä toiminta

Rakenteen sitkeä toiminta koostuu sen paljaalla silmällä näkyvistä muodonmuutoksista ja taipumista. Taipuminen ei yleensä ole ongelma, ellei se ole liian suurta verrattuna sallittuun taipumaan, joka on määritelty Suomen Rakentamismääräyskokoelman ohjeessa B7 /1/. Siellä taipumarajatilat on määritetty pääasiallisesti rakenteen toiminnallisista ja käyttöön liittyvistä ehdoista ja raja-arvoista (esim. kuorirakenteiden kiinnipysyminen, lumen kinostuminen, veden lammikoituminen katolla, tms.). Kuorman poistuessa taipuma myös käytännössä poistuu. Rakenteen taipuvat osat tuovat siihen yleensä sitkeyttä (kuva 20).

Rakenteessa näkyvä taipuminen ei välttämättä ole merkki mistään vaarasta.

Kantavan palkkirakenteen taipuman rajatila on  $L/300$ , missä  $L$  on palkin pituus. Esimerkiksi kuusi metriä pitkä päistään tuettu palkki saa taipua enintään  $\Delta = 6000\text{mm}/300 = 20 \text{ mm}$ .

Vastaavasti ulokepalkin pään taipumarajatila on  $L/150$ .

Välipohjapalkkien suurin sallittu taipuma on  $L/400$ , jolla on haluttu osaltaan rajoittaa itse välipohjan laattojen kokonaistaipumaa, missä laatta voi olla taipuvilla tuilla.

Taipumat ja muodonmuutokset ovat ongelma, jos niistä osa jää kuorman poistuttua pysyviksi. Pysyviä muodonmuutoksia syntyy kun rakenne käy lähellä rakenteellista kestävyyttään. Pysyviä taipumista tms. ei pystytä sanomaan kuinka lähellä murtoa on mahdollisesti käyty. Erityisesti rakenteiden liitosten alueella havaittavat vähäisetkin pysyvät muodonmuutokset pitää viipymättä raportoida, ja korjata, kun sellaisia on havaittu, koska liitosten alueella ei yleensä ole varauduttu näkyviin muodonmuutoksiin. Liitoksissa mahdolliset sallitut muodonmuutokset ovat niin pieniä, ettei niitä normaalisti voi silmin havaita.

Suunnittelussa pysyvä muodonmuutos on eräs käyttörajatiloista. Pysyviä muodonmuutoksia saa syntyä rakenteisiin vain käyttörajatila suuremmilla rasituksilla, jotka ovat käytännössä pienempiä kuin vastaavat murtorajatilan kuormitukset. Oleellista jatkuvan sortuman estämisessä on se, että rakenteen tulee sen jälkeen kun myötöraja on jossakin saavutettu, kyetä jakamaan lisäkuormia uudella tavalla, ja tarvittaessa plastisoitumaan murtumatta tai menettämättä kestävyyttään.

Teräsmateriaalin sitkeys tulee em. ohjeen mukaan valita seuraavasti:

- (1) Ohjeet EN 1993-1-10 /28/ on tarkoitettu käytettäväksi uuden rakenteen materiaalia valittaessa. Niitä ei ole tarkoitettu vanhojen rakenteiden materiaalien arviointiin. Ohjeilla on tarkoitus valita sopiva teräslaji EU standardien mukaisille terästuotteille, jotka on lueteltu ohjeessa EN 1993-1-1 /2/.
- (2) Ohjeet soveltuvat vedetyille rakenneosille, hitsatuille tai väsytytkuormitetuille osille, joissa kuormitusjakson jokin osa on vetorasitusta.
- (3) Ohjeita tulee soveltaa koskien niitä materiaaliominaisuuksia, jotka on määritelty koskien sitkeyttä kyseisessä terästuotestandardissa. Vähemmän helposti työstettäviä teräslaatuja ei pidä käyttää vaikka ne testitulosten perusteella olisivat kelvollisia määriteltyyn tarpeeseen.

## Hauras käyttäytyminen

Rakenteen "hauraan käyttäytymisen" merkit ovat vain harvoin, tai ehkä vain sattumalta havaittavissa ennen vauriota tai sortumista, jotka yleensä tapahtuvat äkillisesti. Ennakoivia merkkejä ongelmasta voivat olla esimerkiksi rakennuksen kuorien osittainen irtoaminen ja korjaustarve, tai yllättävät vesivahingot tms. muutokset verrattuna normaaliin tilanteeseen.

Joissakin tapauksissa on havaittu rakennusten epänormaaleja liikkeitä tai liikkeestä aiheutuneita ääniä. Hauraalla käyttäytymisellä ei tässä tarkoiteta metalliopissa ja väsytettyjen rakenteiden yhteydessä mainittua haurasmurtumaa, joskin haurasmurtumakin on haurasta käytöstä.

Rakenteiden sortumisriskiä voidaan pienentää käyttämällä riittävän kokenutta suunnittelijaa jolla on toimiva laatujärjestelmä. Liikuntahallien kyseessä ollen RakMk:n ohje B7 "Teräsrakenteet, Ohjeet" /1/ ohjaa käyttämään pätevää rakennesuunnittelijaa, jolla on rakenneluokka 1:n pääsuunnittelijan pätevyys. Maankäyttö- ja rakennuslaissa (MRL) annettuja pätevyysvaatimuksia on tarkennettu Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa A2 "Rakennuksen suunnittelijat ja suunnitelmat, määräykset ja ohjeet" /12/. Kyseisen ohjeen kohdan 6.3 mukaisesti laajarunkoisen liikuntapaikan rakennesuunnittelijalla tulee olla AA-luokan pätevyys. Liikuntapaikoissa käytetyt jännevälit lähes poikkeuksetta ylittävät luokan AA raja-arvon.

Rakennuttajan tulee varmistua, että kyseinen AA-pätevyuden omaava suunnittelija käytännössä osallistuu hankkeen suunnitteluun esim. tarkastamalla suunnitelmat.

Mikäli rakennesuunnittelu on jaettu monelle yritykselle ja tekijälle (esim. erilliset perustus-, teräsrakenne-, valmistus-, asennus- ja kuorisuunnittelijat), näistä yhden tulee olla nimetty kyseisen erikoisalan kokonaisuudesta vastaavaksi suunnittelijaksi (Maankäyttö- ja rakennuslaki, 120 §). Vastaavan rakennesuunnittelijan tulee vastata siitä, että kyseisen erikoisalan suunnitelmat yhdessä muodostavat toimivan kokonaisuuden.

## 4. MITOITUSOHJEET JA SOVELLETTAVAT STANDARDIT

### 4.1 Hitsausliitosten mitoitus - ohjeet

Suomessa teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoittaminen voidaan tehdä joko Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMk) määräysten ja ohjeiden mukaisesti tai soveltamalla EU:ssa voimassa olevia Eurocode-ohjeita (taulukko 7).

**Taulukko 7.** Suunnitteluohjeet (kantavien teräsrakenteiden suunnittelussa).

	Suomen Rakennusmääräyskokoelman (RakMk) osat	Eurocodet (otetaan Suomessa käyttöön asteittain syksystä 2007 alkaen) 1)
Kuormitukset	<b>B1</b> (1998) Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset <b>RIL-144</b> (2002) Rakenteiden kuormitusohjeet <b>N:o 578</b> Valtioneuvoston asetus elementtirakentamisen työturvallisuudesta	<b>EN 1991-1:</b> Suunnittelun perusteet <b>EN 1991-1-1:</b> Tiheydet, omat painot ja hyötykuormat <b>EN 1991-1-2:</b> Palolle altistettujen rakenteiden kuormat <b>EN 1991-1-3:</b> Lumikuormat <b>EN 1991-1-4:</b> Tuulikuormat <b>EN 1991-1-5:</b> Lämpökuormat <b>EN 1991-1-6:</b> Työnaikaiset kuormat <b>EN 1991-1-7:</b> Onnettomuuskuormat
Rakenteiden kestävyys/mitoitus	<b>B2</b> (1990) Kantavat rakenteet, määräykset <b>B3</b> (2004) Pohjarakenteet, määräykset ja ohjeet <b>B4</b> (2005) Betonirakenteet, ohjeet (tai BY50) <b>B6</b> (1989) Teräsohjutlevyrakenteet, ohjeet ja vast. <b>B6 Standardit 2001</b> <b>B7</b> (1996) Teräsrakenteet, ohjeet ja vastaavat sovellettavat <b>B7 Standardit 2001</b>  Sovellettavat standardit määrittelevät mm. käytettävät teräspuolivalmisteet, kuten levyt ja profiilit, ja teräsrakenteiden hitsaamiseen liittyvät seikat ja laskentaohjeet.	<b>EN 1992:</b> Betonirakenteet <b>EN 1992-1-1:</b> Yleiset suunnittelusäännöt <b>EN 1992-1-2:</b> Palomitoitus  <b>EN 1993:</b> Teräsrakenteet <b>EN 1993-1-1:</b> Yleiset suunnittelusäännöt <b>EN 1993-1-2:</b> Palomitoitus <b>EN 1993-1-3:</b> Teräsohjutlevyrakenteet <b>EN 1993-1-8:</b> Liitosten suunnittelu <b>EN 1993-1-9:</b> Väsymislujuus <b>EN 1993-1-10:</b> Murtositkeyden arviointi
Muut suunnitteluohjeet	<b>A1</b> (2006) Rakennustyön valvonta, määräykset ja ohjeet <b>A2</b> (2002) Rakennuksen suunnittelijat ja suunnitelmat, määräykset ja ohjeet <b>A4</b> (2000) Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje, määräykset ja ohjeet <b>E1</b> (2002) Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet	Muut ohjeet: <b>EN 1994:</b> Teräs-betoniliittorakenteet <b>EN 1995:</b> Puurakenteet <b>EN 1996:</b> Muuratut rakenteet <b>EN 1997:</b> Geotekninen suunnittelu Ruostumaton teräs: <b>EN 1993-1-4:</b> Ruostumattomasta teräksestä valmistetut rakenteet

- 1) Osa Eurocode-ohjeista on lopullisesti hyväksytty CEN-järjestön toimesta, jolloin niiden merkinnäksi on muuttunut ENV:n sijasta EN! - Kuhunkin ohjeeseen liittyy Kansallinen liite (National Annex).

Suomen RakMk ohjeessa B7 (Teräsrakenteet, ohjeet 1996) on käsitelty rakenteiden valmistusta (luku 9) ja rakenteiden vaatimuksenmukaisuutta (luku 11), ja esitetty, että teräsrakenteiden suunnitteluasiakirjojen tulee sisältää toteutusta varten rakenteen koko-, geometria- ja rakenneainetietojen lisäksi laatuvaatimukset valmistukselle ja asennustyön tulokselle siten, että toteuttajalla on tarvittavat perusteet laatusuunnitelman laatimiseksi (kohta 1.3.2).

Saman kohdan 1.3.2 mukaan teräsrakenteiden piirustuksissa tai suunnittelijan hyväksymässä projektieritelmässä esitetään hitsauksesta vähintään:

- hitsiluokka,
- hitsien hyväksikäyttöaste niistä hitseistä, joissa se ylittää arvon 0,5,
- aineiden ja tarvikkeiden laatu,
- rakenteiden mitat, muoto ja sallitut mittapoikkeamat,
- muut tarpeelliset tiedot kuten esimerkiksi:
  - väsytySKUORMITETUN rakenteen valmistusta koskevat erityisvaatimukset,
  - lamellirepeilyvaaralle alttiiksi joutuvien aineiden hankintaa koskevat erityisvaatimukset,
- tarve erillisen laatusuunnitelman laatimisesta toteuttajalta, jonka sisäinen laadunvalvonta ei ole hyväksytyn tarkastuslaitoksen jatkuvassa valvonnassa.

Hitsausliitosten valmistus pitää standardin SFS 2373 /5/ mukaan tapahtua yhteisymmärryksessä suunnittelijan kanssa. Standardi ei kerro kuinka sen käytännössä pitää tapahtua. Aihetta on hieman tarkennettu Teräsnormikortissa /17/.

Valmistajan laatimassa Projektin laatusuunnitelmassa tulee esittää erityiset laatuikäntännöt, resurssit ja töiden järjestys, ja sen tulee sisältää ainakin seuraavat asiat:

- tarkastelu toteuttajan resursseista, joilla projektieritelmän vaatimukset saavutetaan,
- tarkastus ja testaussuunnitelma,
- menettely vaatimuksista poikkeamien käsittelemiseksi,
- laatuPASSIN sisällön hyväksyntöjen ajankohdat.

RakMk:n ohjeen B7 kohdan 3.1 (Yleiset suunnitteluperusteet) mukaan kantavan rakenteen toimintatapa ja rakenteisiin käytettävät aineet, tarvikkeet ja **liitostavat** valitaan ottamalla huomioon rakenteelle asetettavat lujuus-, muodonmuutoskyky-, jäykkyys-, säilyvyys- ja muut vaatimukset. Lisäksi otetaan huomioon valmistuksen, kuljetuksen ja asennuksen asettamat erikoisvaatimukset sekä kunnossapito.

Hitsausliitosten mitoittamisen osalta Suomen RakMk viittaa sovellettaviin standardeihin, joissa on määritelty hitsien mitoitusohjeet sekä staattisille että väsytyille liitoksille. Sovellettavissa standardeissa (kohta 1.2) on käsitelty pääasiassa hitsausliitosten hitsien a-mittojen määrittelyä. Ko. mitoituskaavat on tässä koottu kohtaan 2. Hitsausliitosten suunnittelusta, eli liitostyyppin valinnasta, ei ole olemassa ohjeita. Kyseistä aihetta käsitellään tässä selvityksessä muutaman käytännön esimerkin avulla.



## 4.2 Sovellettavat standardit

### SFS-standardit:

SFS 2373 /5/. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Vahvistettu 1980-12-31 /5/

- Korvaa yhdessä standardien SFS 2378 ja SFS 2379 kanssa standardin SFS 2373 (1970)  
Standardi SFS 2379 on korvattu standardilla SFS-EN 25817 /11/.

SFS 2378 /6/ Hitsaus. Väsyttävästi kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta.

### EUROCODE:t:

Eurooppalaiset hitsausstandardit ovat vasta muuttuneet ja ne kehittyvät edelleen. Vanhat kansalliset standardit korvautuvat vähitellen harmonisoiduilla eurooppalaisilla standardeilla (hEN). Hitsausliitoksen laatutaso valitaan ja toteutetaan siten, että hitsin lujuuteen ja ulkonäköön liittyvät vaatimukset täyttyvät ja hitsaukseen liittyvät vaaratekijät vältetään.

4.2.1 Standardit, joihin liittyy vaatimuksia koskien hitsausliitosta ja työnlaatua

### Sovellettavat standardit

EN 25817 /11/ (= ISO 5817) Arc-welded joints in steel. Guidance on quality levels for imperfections.

EN 287-1 Approval testing of welders. Fusion welding. Part 1: Steels

EN 288-1 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Part 1: General rules for fusion welding

EN 288-2 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Part 2: Welding procedure specification for arc welding

EN 288-3 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Part 3: Welding procedure tests for the arc welding of steels

EN 288-5 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Part 5: Approval by using approved welding consumables for arc welding

EN 288-6 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Part 6: Approval related to previous experience.

Huom! EN 288- standardien sarja on ollut uusittavana ja se julkaistaan yhdistettynä EN-ISO-standardeina uusilla numeroilla.

## Standardien soveltaminen

Suunnittelija valitsee tai määrittelee vaaditut laatuluokat standardin EN 25817 mukaisesti ja merkitsee ne hitsattujen rakenteiden ja rakenneosien piirustuksiin. Poikkeamat yleisestä laatu-luokasta pitää merkitä erikseen piirustuksiin.

Vaihtoehtoisesti, laatuluokat voidaan määrittellä eri projektidokumentissa (projektieritelmä) ohjeina valmistustyölle, tai siinä tapauksessa että yritys aina käyttää samoja laatuluokkia, ne voidaan antaa konepajan pysyväisohjeina. Siinä tapauksessa, piirustusten ei pidä olla ristiriidassa työselitysten kanssa.

Hitsauskonepajojen tulee käyttää hitsareita, joilla on ohjeen EN 287-1 mukainen pätevyys. (Pätevyys, joka perustuu vastaavaan kansainväliseen tai kansalliseen standardiin, voidaan mahdollisesti hyväksyä, jos asiakas hyväksyy sen). Tätä vaatimusta sovelletaan myös alihankkijan hitsareihin.

Hitsauskonepaja vastaa siitä, että se käyttää sellaisia testattuja ja koettuja hitsausmenetelmiä, jotka varmistavat sen, että määrätyt laatuvaatimukset saavutetaan.

Konepaja laatii kirjallisen Welding Procedure Specification (WPS) -ohjeen kaikista erilaisista hitsaustilanteista, jotka esiintyvät heidän tuotteissaan. WPS:n allekirjoittaa henkilö, joka kyseisessä konepajassa on vastuussa hitsaamisesta (hitsauskoordinaattori). Myös alihankkijoilla pitää olla kirjalliset ja hyväksytyt WPS:t.

Suositteluaan, että WPS:t hyväksytetään EN 288 -standardin asianomaisten osien mukaisesti.

## Standardit, jotka liittyvät laatu järjestelmään (QA system)

Seuraavat kaksi EN-standardia ovat tärkeitä hitsausliitosten laadunvarmistuksen kannalta:

EN 719        Welding coordination. Tasks and responsibilities

EN 729-      Quality requirements for welding. Fusion welding of metallic materials.  
Parts 1 to 4.

EN 729-1 ... Part 1: Guidelines for selection and use

EN 729-2 ... Part 2: Comprehensive quality requirements

EN 729-3 ... Part 3: Standard quality requirements

EN 729-4 ... Part 4: Elementary quality requirements.

### 4.3 Hitsattujen teräsrakenteiden kelpoisuus

Hitsauksen laadunhallinnasta on olemassa standardeja, joiden mukaan toimimalla hitsausliitoksista tulee kelvollisia ja varmuudeltaan riittäviä. Kyseisten standardien mukaiset toimintatavat ovat laajassa käytössä muun muassa teollisuuden laitteistojen valmistuksessa. Niiden tavoin toimivat käytännöt on otettu käyttöön myös teräsrakennus alalla. Kelpoisuuden selvit-

tämismenettelyt esitetään ohjeessa B7 /1/ ja sitä täydentävissä ohjeissa ja teräsrakentamisen toimialajärjestöjen omina ohjeina /17/.

Tarkemmin standardeissa esitetyt toimintatavat ja laadunhallintaan välttämättä tarvittavat asiakirjat ja niiden edellyttämät toimenpiteet tulee esittää niin, että hitsaustyön teettäjät ja tekijät osaavat toimia standardien vaatimalla tavalla.

Oleellisimmat vaatimukset hitsauksen osalta ovat:

1. Kyseistä hitsattavaa työtä varten pitää laatia hitsausohjeet (WPS), jotka on tehty esimerkiksi menetelmäkokeen perusteella (useita menettelytapoja). Menetelmäkokeessa hitsaustavan ja -arvojen soveltuvuus kokeillaan koehitsin avulla. Kun kokeellisesti on todettu tietyllä tavalla syntyvän onnistunut hitsi, parametrit merkitään hitsausohjeeseen ja lopulliset hitsit tehdään samalla tavalla. Hitsausohjeen hyväksyy siihen tarvittavan pätevyyden omaava henkilö.
2. Hitsaajalla pitää olla voimassa oleva pätevyys eli tuotantoa vastaavissa olosuhteissa suoritettu hitsauskoe sekä todistus tietopuolisen kokeen suorittamisesta. Pätevyyden pitää koskea juuri valmistettavan tuotteen hitsausohjeen mukaista suoritustapaa.
3. Hitsaustyöstä pidetään hitsaustyöpöytäkirjaa, josta on mahdollista todeta, että työ on todella tehty hitsausohjeiden mukaisesti.

Turvallisuuden varmistamiseksi rakennuttajan pitää huolehtia, että vaatimusten täytyminen tulee tarkistettua rakentamisorganisaatiossa ennen rakenneosien asennusta. Jollei voida varmistaa, että hitsaustyö on tehty vaaditulla tavalla, hitsausliitoksiin sisältyy riskejä, eikä niitä voida ottaa käyttöön ennen lisätarkastuksia.

## 5. PIENAHITSIN MITOITTAMINEN OSAVARMUUSLUKUIHIN PERUSTUVASSA MITOITUKSESSA

### 5.1 Perusoletukset

Pienahitsien mitoitusta varten tehdään joukko oletuksia, jotka ovat Eurocode 3:n mukaisia ja koskevat hitsien mekaanisia ja geometrisia ominaisuuksia. Hitsiaineen tulee olla yhtä hyvää kuin perusmetalli. Hitsin tehollinen pinta-ala on a-mitan ja hitsin mitoituspituuden tulo. Yleensä mitoituspituus on sama kuin täysikokoisen hitsin pituus, johon kuuluvat hitsin käännteet nurkissa, jos hitsi on jatkuva. Pitkissä hitseissä ja katkohitseissä tehollista pituutta pitää pienentää.

Rakenteellisten pienahitsien a-mitan tulee yleensä olla vähintään 4 mm /5/. Jos hitsin tehollinen pituus l on pienempi kuin 40 mm tai 6 kertaa a-mitta (suurempi valitaan), hitsin ei katsota siirtävän voimia. Tämä tulee usein esille erityisesti arvioitaessa työmaalla tehtyjä hitsejä.

Mitoitusohjeiden selventämiseksi on liitteeseen 1 laskettu kolme erilaista esimerkkiä sekä perusmitoitusmenetelmällä että yksinkertaistetulla menetelmällä (kohdat 5.2 ja 5.3).

### 5.2 Perusmitoitusmenetelmä

Hitsien perusmitoitusmenetelmänä on ns. komponenttimenetelmä, joka on esitetty ohjeessa EN 1993-1-8:2005, Design of joints /27/, päävaihtoehtona. Pienahitsiin vaikuttava ulkoinen kuormitus jaetaan siinä komponenteiksi hitsin pituusakselin suuntaan ( $\parallel$ ) ja sitä vastaan kohtisuoraan suuntaan ( $\perp$ ), sekä hitsin laskentapoikkipinnan suuntaan ja sitä vastaan kohtisuoraan suuntaan. Näitä vastaavat jännitykset (kuva 21) ovat:

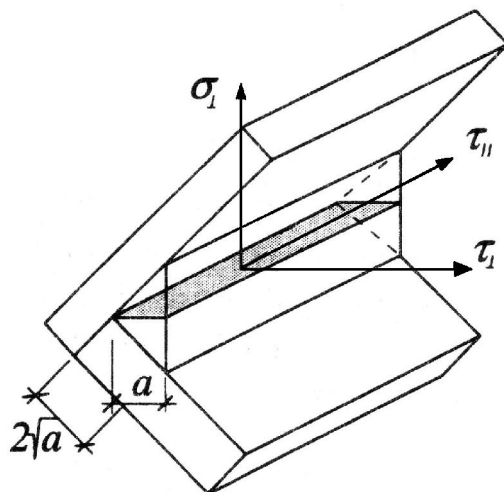
$\sigma_{\perp} = F_{\sigma_{\perp}} / (al)$  on normaalijännitys hitsin laskentapoikkipinnassa.

$\tau_{\perp} = F_{\tau_{\perp}} / (al)$  on leikkausjännitys hitsin laskentapoikkipinnassa kohtisuoraan hitsin pituussuuntaa vastaan.

$\tau_{\parallel} = F_{\tau_{\parallel}} / (al)$  on leikkausjännitys hitsin laskentapoikkipinnassa hitsin pituus suuntaan.

$\sigma_{\parallel}$  on hitsin suuntainen normaalijännitys hitsin poikkileikkauksessa (laskentapoikkipinta).

Normaalijännitystä  $\sigma_{\parallel}$  ei oteta mitoituksessa huomioon, koska sillä on häviävän pieni vaikutus muihin komponentteihin verrattuna.



**Kuva 21.** Pienahitsin jännitykset ja jännityskomponenttien suunnat.

Hitsiliitosta koskee kaksi mitoituskriteeriä: Hitsin jännitys ja sen raja-arvo lasketaan von Misesin myötöehdon mukaisesti ja jännitystä verrataan vetomurtolujuuteen. Lisäksi hitsin poikkileikkaukselta vastaan kohtisuoralle jännitykselle  $\sigma_{\perp}$  on annettu lisäehto:

$$1) \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{ja} \quad 2) \sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

missä

$f_u$  on liitettävistä osista heikomman materiaalin vetomurtolujuuden nimellisarvo.  
 $\gamma_{M2}$  on hitsiliitoksien osavarmuusluku (= 1,25).

Korrelaatiokerroin  $\beta_w$  otetaan seuraavasta taulukosta 15. Vetomurtolujuuden  $f_u$  arvo valitaan standardeista SFS-EN 10025-1...4 riippuen ainepaksuudesta ja teräslajista.

**Taulukko 8.** Korrelaatiokerroin  $\beta_w$  teräslaaduittain.

SFS-EN10025-1...4 Teräslaatu	S235	S275	S355	S420	S460
Vetomurtolujuuden vähimmäisarvo	360	430	510	520	550
Korrelaatio- kerroin $\beta_w$	0,8	0,85	0,9	1,0	1,0

Taulukon 8 väliarvot voidaan laskea suoraviivaisesti interpoloimalla. Vetomurtolujuuden arvot vastaavat levyä paksuutta  $\leq 40$  mm. Lujemmille teräksille löytyy vetomurtolujuuden ja kerroimen  $\beta_w$  arvot standardeista.

Koska perusmitoitusmenetelmässä jännityskomponentit lasketaan liitoksen kunkin hitsin kaikissa olennaisissa poikkileikkauksissa, sitä voi soveltaa mihin tahansa hitsaamalla tehtyihin

liitoksiin. Ns. yksinkertaistettu menetelmä soveltuu staattisesti määrättyihin hitsausliitoksiin, ja sillä saadaan joko samoja tai hieman suurempia a-mittoja kuin perusmitoitusmenetelmällä.

## LASKELMAT

Hitsien mitoitus laskelmat voidaan tarvittaessa laatia lähtien mille tahansa hitsiin vaikuttavalle kuormitusresultantille  $F_{Ed}$  mielivaltaisessa suunnassa  $\alpha$  (= kuorman ja hitsin pituusakselin välinen kulma) siten, että lasketaan kuormituksen jännityskomponentit hitsin vaikutustasossa ja hitsin akselin suunnassa,

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed} \cdot \sin \alpha}{a \cdot L_w \sqrt{2}} \quad \text{ja} \quad \tau_{\parallel} = \frac{F_{Ed} \cdot \cos \alpha}{a \cdot L_w}, \quad \text{lisäksi merkitään } \sigma_w = \frac{F_{Ed}}{a \cdot L_w}$$

Mitoitusehdosta 1 voidaan, sijoittamalla  $\sigma_w$ :n tilalle eo. lauseke, ratkaista hitsin a-mitta. Saadaan:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_w \cdot \sin \alpha}{\sqrt{2}}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{\sigma_w \cdot \sin \alpha}{\sqrt{2}}\right)^2 + (\sigma_w \cdot \cos \alpha)^2\right]} = \sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} \\ &= \sigma_w \cdot \sqrt{2 \cdot \sin^2 \alpha + 3 \cdot \cos^2 \alpha} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \end{aligned}$$

Lopullista a-mittaa määritettäessä pitää ottaa huomioon myös ehto 2 koskien jännitystä  $\sigma_{\perp}$ !

**Huom!** Joissakin staattisesti epämääräisissä tapauksissa on helpointa lähteä liikkeelle levyssä (paksuus = t) vaikuttavista veto ja leikkausjännityksistä  $\sigma_{z,Ed}$  ja  $\tau_{yz,Ed}$ , joista saadaan hitsissä kussakin poikkileikkauksessa vaikuttavaksi jännitykseksi:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_{z,Ed} \cdot t}{2\sqrt{2} \cdot a} \quad \text{ja} \quad \tau_{\parallel} = \frac{\tau_{yz,Ed} \cdot t}{2 \cdot a}.$$

Sijoittamalla nämä vertailuyhtälöön 1, saadaan:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{z,Ed} \cdot t}{2\sqrt{2} \cdot a}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{\sigma_{z,Ed} \cdot t}{2\sqrt{2} \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz,Ed} \cdot t}{2 \cdot a}\right)^2\right]} \\ &= \frac{t}{2a} \cdot \sqrt{2\sigma_{z,Ed}^2 + 3\tau_{yz,Ed}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}, \end{aligned}$$

mistä edelleen saadaan a-mitalle laskentakaava:

$$a \geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t}{2 \cdot f_u} \cdot \sqrt{2\sigma_{z,Ed}^2 + 3\tau_{yz,Ed}^2}$$

### 5.3 Yksinkertaistettu menetelmä

Eurocode 3:ssa esitetään myös yksinkertaistettu kaava, joka ei vaadi jännityskomponenttien tuntemista itse hitsissä, eli voiman suuntaa ei ole rajoitettu. Kaava perustuu keskiarvojännitysmenetelmään, jossa oletetaan hitsin kestävyuden olevan yhtä suuri kuin leikkauslujuus riippumatta siitä, missä suunnassa voima vaikuttaa. Keskiarvojännitysmenetelmä antaa varmallalla puolella olevan tuloksen. Yksinkertaistetussa menetelmässä liitoksen lujuusteknisenä vertailulukuna on hitsausliitoksen materiaalin vetomurtolujuuden  $f_u/\sqrt{2}$  sijasta  $f_u/\sqrt{3}$ .

Pienahitsin tulee täyttää seuraava mitoitusehto:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$$

missä  $F_{w,Ed}$  on hitsiin vaikuttava ulkoinen rasitus =  $F/l$  pituusyksikköä kohti ja  $F_{w,Rd}$  on hitsin vastaava kestävyuden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti.  $F_{w,Rd}$  lasketaan kaavasta:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad \text{ja} \quad f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

missä  $a$  on hitsin  $a$ -mitta ja  $l$  on hitsin pituus,  
 $F$  on hitsiin vaikuttavien ulkoisten voimien resultantin, ja  
 $f_{vw,d}$  on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo.

### 5.4 Pitkät hitsit

Pitkän hitsin jännitysjakautuma limiliitoksessa on periaatteeltaan samanmuotoinen kuin pitkässä ruuvi- tai niittiliitoksessa. Liitoksen päissä esiintyy suurimmat jännitykset. Murtorajitilassa juuri ennen murtumista plastinen deformaatio päiden lähellä tasaa leikkausjännityksiä. Jos liitos on tarpeeksi pitkä, jännitysjakautuma ei kuitenkaan muutu täysin tasaiseksi.

Ohjeen Eurocode 3 ENV 1993-1-1 /2/ mukaan pitkän hitsin mitoituskestävyys limiliitoksessa tulee kertoa pienennyskertoimella  $\beta_{Lw,1}$ , jotta todellinen jännitysjakautuma tulee huomioon otetuksi. Jos hitsin pituus on suurempi kuin 150a, kerroin  $\beta_{Lw,1}$  saadaan:

$$\beta_{Lw,1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a} \leq 1,0$$

missä  $L_j$  on limityksen kokonaispituus voiman suunnassa.

Kerroin  $\beta_{Lw} = \beta_{Lw,2}$  on 1,7 metriä pitemmissä pienahitseissa, jotka ovat levyrakenteiden poikkittaisissa jäykisteissä :

$$\beta_{Lw,2} = 1,1 - \frac{L_w}{17} \quad , \text{ mutta kuitenkin } 0,6 \leq \beta_{Lw,2} \leq 1,0$$

missä  $L_w$  on hitsin pituus metreissä.

## 6. AINETTARIKKOMATON HITS AUSLIITOKSEN TESTAUS

Hitsausliitosten yleisimmät ainetta rikkomattomat tarkastusmenetelmät ovat radiografinen kuvaus, ultraäänitarkastus, magneettijauhetarkastus, tunkeumanestetarkastus ja silmämääräinen tarkastus (taulukko 9). Ne soveltuvat eri tarkoituksiin, ja siksi käytännössä tulee usein käyttää useampia tarkastusmenetelmiä, joista toisilla löydetään vain hitsausliitosten pinnassa olevia vikoja ja toisilla syvemmällä olevia näkymättömiä vikoja.

Ainetta rikkovia menetelmiä käytetään lähinnä hitsaus- ja menetelmäkokeissa, eivätkä ne kuulu varsinaisesti jokapäiväiseen tarkastustoimintaan konepajassa.

Teräsrakenteiden suunnittelussa lähes 80 % kaikista hitseistä on pienahitsejä, joiden erityisesti syvemmällä olevien vikojen tarkastaminen ainetta rikkomattomilla menetelmillä on vaikeaa tai mahdotonta. Siksi erityisesti kuormaa siirtävien primäärirakenne-elementtien välisissä kokoonpanoliitoksissa esiintyvien pienahitsien valmistuksen laadunvarmistus (WPS ja menetelmäkoe) tulee suunnitella ja toteuttaa huolellisesti. Tarkastamiseen liittyvien puuttuvien mahdollisuuksien takia on sanottu, että pienahitsi on kaikkein vaikein hitsi.

### Laadun tarkkailun vaihtoehdot

Hyvän laaduntarkastusohjelman tulee perustua siihen, että kullakin tarkastusmenetelmällä on omat perusongelmansa. Esimerkiksi radiograafinen kuvauksella ja ultraäänitarkastuksella on selkeästi erilaiset suunnattavuustekijät, mikä saattaa ohjata valitsemaan tiettyyn tehtävään sopivimman menetelmän. Niiden vahvuudet ja heikkoudet yleensä täydentävät toisiaan. Kun radiografisella kuvauksella ei pystytä havaitsemaan laminoitityyppisiä vikoja, ultraääni on siinä paljon parempi. Toisaalta ultraäänitarkastus soveltuu huonosti hyvin huokoisten hitsien tarkastukseen kun taas radiografinen kuvaus soveltuu siihen melko hyvin.

Käytettiinpä mitä tahansa tarkastusmenetelmää, seuraavassa listassa mainittujen hitsin laatuun vaikuttavien seikkojen huomioon ottaminen helpottaa ja vähentää jatkotarkastuksia rutiininomaiseen määrään. Tällöin kunnolliset ainetta rikkomattomat tarkastusmenettelyt toimivat muuttujien vakioimisessa ja hitsien laadun pitämisessä standardin vaatimusten mukaisena.

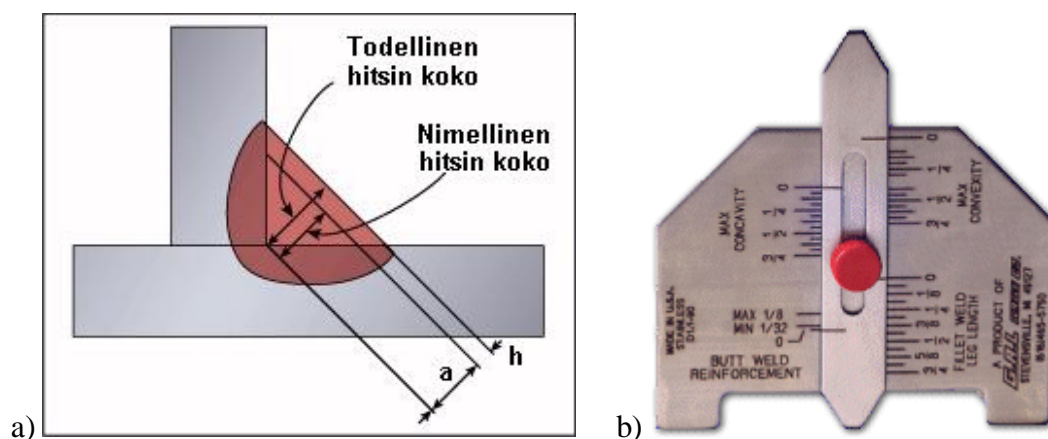
- 1. Prosessin valinta.** Hitsausmenetelmän pitää soveltua tehtäväänsä.
- 2. Valmistelut.** Liitoksen muoto pitää olla oikein ja yhteensopiva hitsausprosessin kanssa.
- 3. Proseduurit.** Hitsaustyöohje (WPS) pitää määritellä yksityiskohtaisesti ja sitä pitää noudattaa kuuliaisesti hitsauksen aikana.
- 4. Ennakkotestaus.** Täysimittakaavaisia tai simuloituja koekappaleita pitää käyttää todistamaan että prosessi ja menetelmä toteuttavat halutun laatutason.
- 5. Henkilöstö.** Tehtävään pitää valita riittävän pätevä henkilöstö.



## 6.1 Silmämääräinen tarkastus

Hitsaamalla valmistettujen rakenteiden valmistuksessa on periaatteena, että hitsin laadusta pitää aina varmistua tavalla tai toisella. Termi "hitsin laatu" on kuitenkin suhteellinen, ja hitsaussovellutus lopulta itse määrittelee mikä on hyvää laatua. Yleensä sellainen hitsi on hyvälaatuinen, joka näyttää vaatimustenmukaiselta ja suorittaa tehtävän, johon se tarkoitettiin. Siksi hitsin laadun varmistamiseksi pitää määrittää se toimivuustaso, jonka hitsisovellutus vaatii. Olipa laatustandardi mikä tahansa, kaikki hitsit tulee tarkastaa silmämääräisesti.

Kaikki hitsit tarkastetaan heti hitsauksen jälkeen koko pituudeltaan silmämääräisesti (kuva 22). Tarkastukseen osallistuvat sekä hitsaajat että työnjohtajat ja tarkastajat. Tarkastaminen ei vaadi toistaiseksi muodollista pätevyyttä, mutta tarkastajalta vaaditaan kokemusta ja tietämystä hitsauksen tarkastamisesta ja hitsaustyöstä.



**Kuva 22.** Pienahitsi. a) a-mitan tarkastus, b) eräs pienahitsitulkkimalli.

Apuvälineinä voidaan käyttää taskulamppua ja peiliä. Silmämääräiseen tarkastukseen kuuluu hitsien sijainnin, koon ja muodon tarkastus, pienahitsin a-mitan tarkastus (kuva 22), pintojen tarkastus sekä pintavirheiden (esim. reunahaava), syytysjälkien ja roiskeiden havaitseminen. Tarkastuksessa tarvitaan lisäksi suoraa kulmaa, jolla tarkastetaan hitsin pinnan suoruus ja kohtisuoruus.

Fokus tulee olemaan primääristi se, että rakennusalalla hitseistä on 80 % pienahitsejä, eikä niitä läheskään kaikissa tapauksissa pystytä valmistuksen yhteydessä tarkastamaan tehokkaasti, joten silmämääräinen tarkastus liittyy aina hyvän hitsaustyön laadunvarmistukseen.

Yleensä hitsin hyvännäköinen pinta kertoo korkeasta laadusta, vaikkei se kerrokaan mitään hitsin sisäisestä laadusta. Hitsin silmämääräinen tarkistus on kaikkein halvin tarkastusmenetelmä. Monissa muissa menetelmissä sitä vaaditaan ennakkotarkastuksena, koska ei ole ehkä mitään mieltä alistaa ilmeisen huonoa hitsiä muihin tarkastuksiin.

Ennen hitsausta tulee tarkastaa materiaalien puhtaus ja eheys. Tällöin pitää poistaa rasvat, maali, öljy, ruoste tms., ja tarkastaa liitettävien kappaleiden tasomaisuus, suoruus ja mitat sekä osien yhteensopivuus. Lisäksi hitsausprosessi ja sen muuttujat tulee tarkistaa, kuten lisäai-

nepuikot ja niiden säilytys, tyyppi, laitteiden asetukset ja esilämmitys tms. Nämä edellytykset pätevät luonnollisesti kaikkiin tarkastusmenetelmiin.

Valmistuksen (hitsauksen) aikana hitsin palon ja hitsin pään kraatterin tarkastus voi paljastaa mahdollisia ongelmia, kuten halkeamia, epämääräisiä lävistyksiä ja kaasui- tai epäpuhtauslukeumia. Hitsivirheitä, jotka voidaan tunnistaa silmämääräisesti hitsauksen aikana, ovat mm. halkeamat, pintaviat, pinnan huokoisuus tms.

Yhden palon hitseissä riittää useinkin hitsin tarkastus kunkin hitsausoperaation jälkeen ja aika ajoin työn edistyessä. Kun hitsi muodostuu useammasta palosta, saattaa olla järkevää tarkastaa kukin palko erikseen ennen seuraavan hitsaamista. Juuren hitsaaminen monipalkoisessa hitsausliitoksessa on kaikkein riskialttein työvaihe. Juurihitsi on erityisen herkkä halkeamiselle, ja koska se kiinteytyy nopeasti, siihen voi kertyä kaasua tai likaa. Tällöin seuraavia palkoja hitsattaessa ongelmat saattavat helposti lisääntyä.

Silmämääräisellä tarkastuksella voidaan välttää yli- ja alihitsaamista. Liian pieniä hitsejä ei voi hyväksyä. Ylihitsaaminen ja liian suuret hitsit taas maksavat turhan paljon, ja voivat lisäksi aiheuttaa ongelmia rakenteiden vääristymisen tai kutistumisen muodossa.

Hitsauksen jälkeen voidaan silmämääräisesti havaita useita erilaisia hitsivirheitä ja pintavikoja, kuten epätasaisuutta, halkeamia, huokoisuutta ja hitsikraattereita. Myös mittaamalla voidaan todeta erilaisia esiintyviä virheitä. Pintavikojen toteamiseksi hitsipinnat pitää puhdistaa roiskeista. Hiekkapuhallusta ei kuitenkaan saa tehdä pinnalle ennen sen tarkastusta, koska se saattaa sulkea ohuet halkeamat ja tehdä niiden havaitsemisen mahdottomaksi.

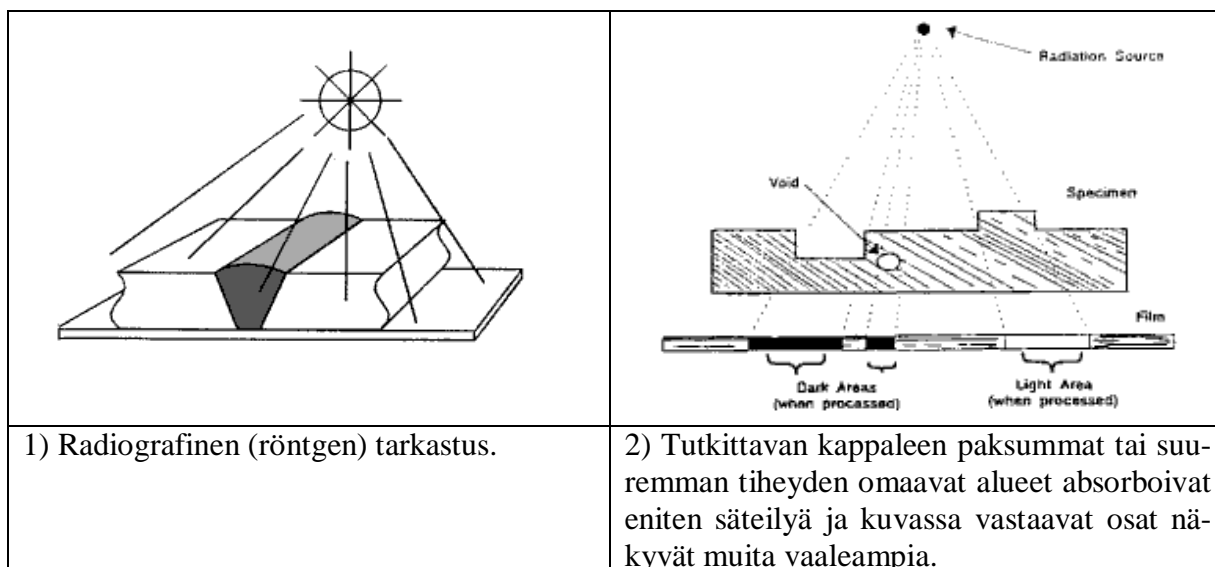
Visuaalisella tarkastuksella voidaan havaita pelkästään hitsin pinnan virheitä. Projektieritelmissä saatetaan vaatia tietyille hitsausliitoksille käytettäväksi myös muita NDT-menetelmiä. NDT-menetelmillä voidaan havaita virheitä, mutta niillä ei voi mitata virheiden vaikutusta hitsien käytettävyyteen tai toimintaan. Sitä voidaan selvittää lähes pelkästään rikkovilla tarkastusmenetelmillä.

## 6.2 Radiografinen kuvaus

Radiografinen kuvaus (kuva 23) suoritetaan yleensä kun tarkastuskohde on valmistuksen loppuvaiheessa, esim. hionnan tai lämpökäsittelyn jälkeen. Yleensä käytetään seuraavissa kuvissa esitettyjä kuvaustekniikoita, missä säteilylähde on kuvattavan kappaleen etupuolella ja filmi sen vastakkaisella puolella. Radiografinen kuvaus ei ole mahdollista, jos säteilylähde tai filmiä ei voida sijoittaa kuvattavan kohteen eri puolille. Tällainen tilanne esiintyy esimerkiksi kattoristikossa putkiprofiilien liitoksissa, kun putkien päät ovat suljettuja. Sama pulma koskee myös useimpia putkiprofiilien sivuun liitettyjä varusteluosia tai putkien päihin kiinnitettyjä laippoja ja niiden hitsiliitoksia, jos valmiin rakenteen sisään ei voi sijoittaa filmiä tai säteilylähdetä.

Kuvauksen tarkkuus todetaan käyttämällä standardin ISO 1027 lankaindikaattoria (IQI), joka sijoitetaan standardin mukaisesti kuvattavan kohteen säteilylähteen puoleiselle pinnalle. Kuvatarkkuus tai sen luokka todetaan näkyvän langan halkaisijan ja säteilyn läpäisemän kokonaisaineenpaksuuden suhteena. Kuvauksluokat A ja B on määritelty kullekin kokonaisaineenpaksuudelle näkyvän langan halkaisijan vähimmäismittana. Luokka A vastaa yleisesti käytet-

tävää kuvaustekniikkaa. Luokkaa B käytetään, mikäli on odotettavissa, ettei luokan A mukainen kuvatarkeus ole riittävä.



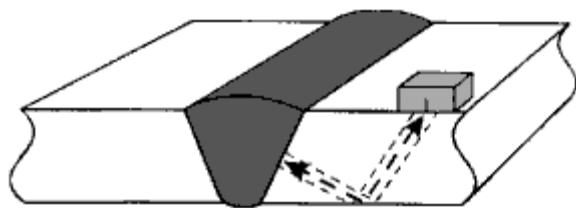
**Kuva 23.** 1) Säteilylähde ja kappale, 2) Kuvauksen periaate.

Filmiin, kuvamääriin, filmin kehittämiseen, kuvaamistapoihin ja –etäisyyksiin sekä kuvien tulkitsemiseen liittyvät tarkemmat ohjeet löytyvät standardista SFS 3207. Kuvien tulkintaa ja mm. teräsrakenteiden hitsiluokille asetettuja hyväksymisrajoja on esitetty standardissa SFS 5067.

## 6.2 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastusta (kuva 24) käytetään rikkomattomana aineenkoestusmenetelmänä tutkittaessa ja määritettäessä kappaleen mittoja ja sen sisältämiä epäjatkuvuuksia kuten ainevikoja tai liitoskohtia sekä eräitä aineominaisuuksia kuten kimmovakioita.

Suurtaajuuksinen (0,1 ... 25 MHz) ääni lähetettynä tarkastettavaan kappaleeseen pulsseina tai jatkuvana värähtelynä aikaansaa ilmiöitä, joiden avulla poikkeaman etäisyys tai paikka voidaan määrittää. Hyväksyttäviä ultraäänitarkastustapoja ovat esimerkiksi kaikumenetelmä, läpäisymenetelmä ja resonanssimenetelmä, joita kuva havainnollistaa. Ultraäänimittaus voidaan suorittaa kappaleen yhdeltä puolelta, mikäli tutkittava ainepaksuus on riittävän suuri tai huolehditaan siitä, että luotaimen ns. kuollut alue minimoituu.



**Kuva 24.** Ultraäänitarkastusmenetelmän periaate.

Ultraääni aikaansaadaan, lähetetään ja vastaanotetaan normaalisti pietsosähköiseen ja sen käänteisilmiöön perustuvilla luotaimilla eli äänipäillä. Tulokset näytetään kuvaputkea, mittaria tai digitaalilaskinta käyttäen.

Tarkastuskohdan pinnan tulee olla sellainen, että saadaan hyvä akustinen yhteys ilman että pintaan jääneet kiinteät kerrokset aiheuttavat virhenäyttöjä. Tämä edellyttää yleensä pinnan puhdistamista tutkittavaan aineeseen saakka. Ruoste, hilse, pinnoitteet ym. poistetaan ja pinta tasoitetaan tarvittavalta alueelta. Pinnan tulee olla sitä sileämpi mitä suurempaa taajuutta käytetään ja mitä pienempiä epäjatkuvuuksia halutaan todeta. Luotaimen valintaan vaikuttaa mm. haluttu luotaussuunta, aineen laatu, kappaleen koko. Yleensä tulee valita mahdollisimman pieni taajuus ja suuri luotaimen koko, koska aineen vaimentava vaikutus on silloin pieni, luotaimen ohjaaminen helpompaa eikä yhteysvaikeuksia esiinny siinä määrin kuin pienillä luotaimilla. Sopivan luotaintyyppin valitsemiseksi tulee suorittaa esikokeita.

Kappale luodetaan mahdollisimman järjestelmällisesti siten, että luotaussuunta on koh-tisuorassa oletettuun heijastuspintaan nähden. Tarkastusselostuksessa esitetään tiedot luotausmenetelmästä, luodattavasta kappaleesta, tarkastusvälineistä ja sen säätöarvoista sekä tarkastustulos, missä esitetään vikojen sijainti, suuruus, lukumäärä ja laatu sekä niiden arvos-telu.

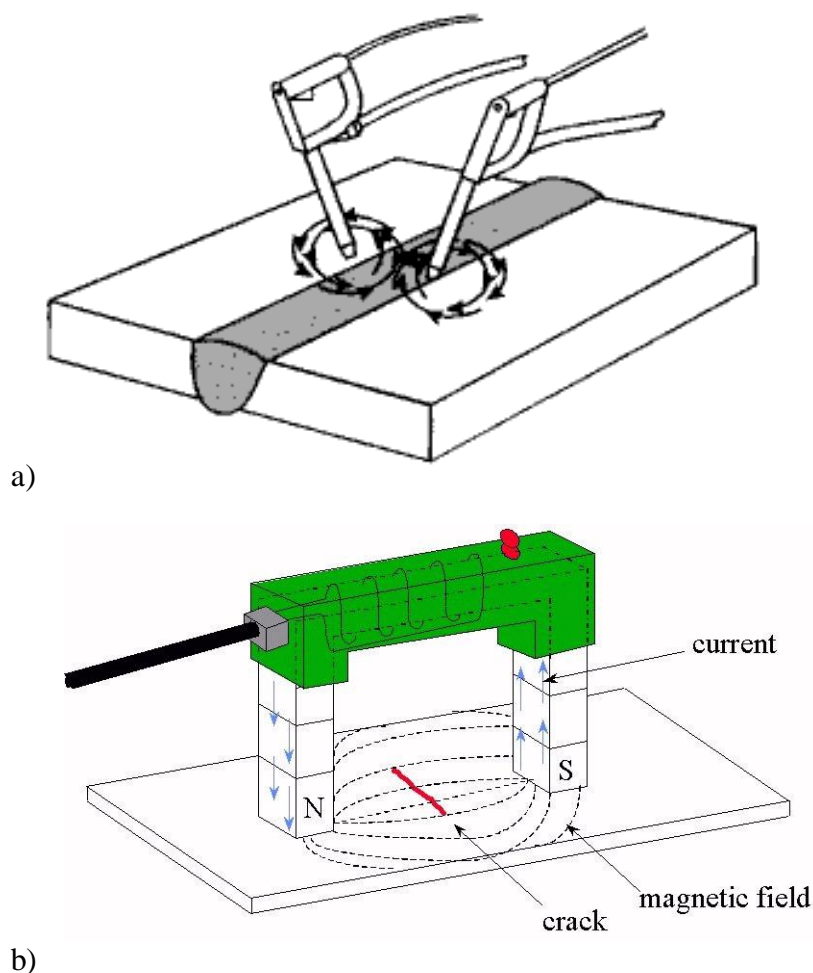
Ultraäänitarkastus soveltuu hyvin erilaisten tunkeumahitsien tarkistukseen, kuten V- ja K-hitseillä tehdyt hitsausliitokset, esimerkiksi laippaliitokset putkiin, missä hitsien pinnat ovat suunnilleen samansuuntaisia liittyvien levyjen kanssa. Ultraäänitarkastus ei yleensä sovellu pienahitsien (fillet) tarkastamiseen siksi, että siinä liittyvien kappaleiden väliin jää rakoja, ja pienahitsin pinta ei ole liittyvien kappaleiden pintojen suuntainen.

### 6.3 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastus (kuva 25) on rikkomaton aineenkoetusmenetelmä, joka soveltuu ferromagneettisten aineiden pintaan asti avoimien tai pinnan läheisyydessä olevien vikojen kuten halkeamien, ylivalssautumien, taontapojen, huokosten ja kuonasulkeumien havaitsemiseen. Magneettijauhetarkastuksella saadaan esille myös muita aineesta tai rakenteesta johtuvia epäjatkuvuuskohtia, jotka eivät ole luonteeltaan vikoja.

Menetelmässä tarkastettava kappale magnetoidaan ja sen pinnalle levitetään magneettijauhetta. Kappaleen pinnassa tai sen läheisyydessä olevat viat tai muut epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat magneetikenttään häiriökohtia, joihin magneettijauhe kerääntyy. Kerääntyneen magneettijauheen sijainnin, koon ja muodon perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä epäjatkuvuuskohdasta

Magneettijauhe on hieno- ja tasajakoista, ferromagneettista jauhetta, jota käytetään joko nesteeseen sekoitettuna (märkämenetelmä) tai kuivana (kuivamenetelmä). Lisäksi erotetaan toisistaan tavallisessa valossa erottuvat (värilliset) ja ultraviolettivalossa erottuvat (fluoresoivat) jauheet. Menetelmän yksityiskohtia ja magnetoinnin suorittamista on selitetty tarkemmin standardissa SFS 3286.



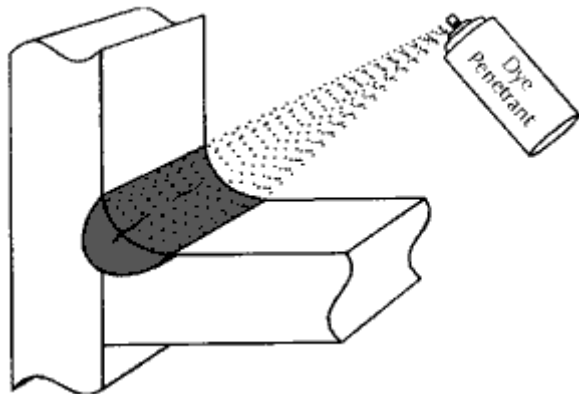
**Kuva 25.** Magneettijauhetarkastus – a) kaaviokuva, b) Suomessa iesmagnetointi yleisin.

Tarkastus sopii puhtaille hitsatuille, valssatuille ja taotuille pinnoille, hiekkapuhalletuille tai karkeahiotuille valukappaleille sekä työstetyille pinnoille. Tarkastus ei sovi kaikille kierteille, rouhintatyöstetyille pinnalle tai karkealle valupinnalle. Tarkastettavan pinnan tulee olla kuiva ja puhdas. Ohut maalikalvo ei vaikuta tarkastustulokseen. Jos kappale tarkastetaan myös ulträänellä, suositellaan magneettijauhetarkastus tehtäväksi ensin.

Tarkastusselostuksessa esitetään tarkastusta koskevat lähtötiedot, tiedot tutkittavasta kappaleesta, tarkastusvälineistöstä sekä tarkastustulos, missä esitetään vikojen sijainti, suuruus, lukumäärä ja laatu sekä niiden arvostelu.

## 6.4 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus (kuva 26) on rikkomaton aineenkoetusmenetelmä, joka soveltuu pintaan asti avoimien vikojen, kuten halkeamien, ylivalssautumisen, huokosten, kerrostumien, liitosvikojen, vuotokohtien ja vastaavien epäjatkuvuuksien havaitsemiseen kappaleissa, joiden aine ei ole luonnostaan huokoista.



**Kuva 26.** Tunkeumanesteen avulla tapahtuva hitsitarkastus.

Tarkastus tehdään siten, että kappale puhdistetaan ja tunkeumaneste levitetään kappaleen pinnalle, josta se tunkeutuu kapillaarivoiman johdosta halkeamaan. Nesteen saatua aikaa tunkeutua vikoihin, pestään ylimääräinen neste pois ja pinnalle levitetään kehite, johon imeytyy ja leviää osa vikaan jääneestä tunkeumanesteestä. Kehitteeseen imeytyneen tunkeumanesteenäyttämän sijainnin ja muodon perusteella voidaan viasta tehdä johtopäätöksiä.

Tarkastettaviksi soveltuvat pinnoittamattomat ja puhtaat hitsatut, valssatut ja taotut pinnat, hiekkapuhalletut tai karkeahiotut valukappaleet sekä työstetyt pinnat. Tarkastettavan kappaleen pinna tulee olla kuiva ja puhdas.

Tarkastusselostuksessa esitetään tiedot tarkastettavasta kappaleesta, kuten nimi, merkinnät, tunnusnumero, aine, valmistusvaihe, pinnan laatu sekä tarkastettavat alueet. Siinä esitetään myös tiedot tarkastusvälineistä ja menetelmistä, sekä tarkastustulos, kuten vikojen sijainti, suuruus, lukumäärä ja laatu, sekä niiden arvostelu.

Taulukko 9 - Yhteenveto ja opas tärkeimmistä hitsien ainetta rikkomattomista tutkimusmenetelmistä					
Tutkimusmenetelmä	Tarvittavat laitteet	Mahdollistaa havaitsemaan	Edut	Rajoitukset	Huomiot
<b>Silmämääräinen tarkastus</b>	Suurennuslasi Hitsin pienen mittari Mittanauha Suorakulma Työohjeet ja standardit	Pintaviat - halkeamat, huokoisuus, kraatterit, kuonasulkeumat, kiertymät, alimittaiset hitsit, ylihitsaus, epämuotoutuneet palot, epäsuoruudet, huono sovitus	Halpa hinta. Voidaan soveltaa kesken työn, sallii virheiden korjaamisen. Antaa viitteen väärästä hitsausohjeesta.	Soveltuu pelkästään pintaviakojen tarkastamiseen. Ei mahdollista jatkuvaa seurantaa.	Pitää aina olla pääasiallinen tarkastuskeino, riippumatta siitä mitä muita tekniikoita käytetään. On ainoa "tuotava" testausmenetelmä. On tarpeellinen kaikille niille jotka jotenkin osallistuvat hitsin valmistukseen.
<b>Radio- grafinen kuvaus</b>	Kaupasta ostettava röntgen- tai gammasädeyksikkö, joka on tehty erityisesti hitsien, valujen ja taosten tarkastukseen. Kuvaus ja kuvankäsittely mahdollista. Fluorisoiva näyttölaitteisto.	Sisäiset makroskooppiset viat - halkeamat, huokoisuus, sulkeumat, epämetalliset sulkeumat, juuren epätäydellinen tunkeuma, juuren pyöreys, jähmettymät ja läpialaneet kohdat.	Kun mahdolliset viitteet vioista on tallennettu filmille, antaa pysyvän tilan tiedon hitsistä. Kun hitsiä katsotaan fluorisoivalla näytöllä, sisäpuolinen tarkastus on kohtuuhintaista.	Vaatii taitoa kuvauskulmien valinnassa, käytettävän laitteen valinnassa, ja tulosten tulkinnessa. Vaatii turvallisuusohjeita. Ei yleensä soveltu pienahitsien tarkastukseen.	Röntgensäteeseen perustuva tarkastus vaaditaan monissa suunnitteluohjeissa ja tuotevaatimuksissa. On hyödyllinen hitsaajien ja hitsausprosessin luokittelussa. Hinnan takia käyttö pitää rajoittaa niihin sovellutuksiin, joissa muilla menetelmillä ei saavuteta vaadittua varmuustasoa.
<b>Magneettijauhetarkastus</b>	Kaupasta hankittava erityislaitteisto. Magneettijauheet - kuivat tai märät; voivat olla fluoresoivia ja nähtävissä ultravioletissa valossa.	Erinomainen menetelmä pinnan epäjatkuvuuksien havaitsemiseksi - sopii erityisesti pintahaavojen havaitsemiseen.	Yksinkertaisempi käyttää kuin radiograafinen tarkastus. Sallii tarkastusherkyden kontrolloimisen. Suhteellisen halpa menetelmä.	Soveltuu pelkästään magneettisille metalleille. Vaatii taitoa tulosten tulkinnessa ja epäolennaisten kuvioiden tunnistamisessa. On vaikea käyttää epätasaisilla pinnoilla.	Pitkät magneetikentän suuntaiset virheet eivät ehkä anna kuviota; tästä syystä magneetikenttä pitää voida aktivoida kahdesta eri suunnasta lähes suorassa suunnassa toisiinsa.
<b>Tunkeumaneste-tarkastus</b>	Kaupalliset välineistöt joissa fluorisoivaa tai värjäävää tunkeumanestettä ja kehitysainetta. Välineissä on ultraviolettilähde jos käytetään fluoresoivaa menetelmää.	Voidaan havaita pintahalkeamat jotka eivät ole heti nähtävissä pelkillä silmillä. Erinomainen menetelmä hitsausliitosten vuotokohtien päikallistamiseen.	Soveltuu sekä magneettisille että ei-magneettisille materiaaleille. Helppokäyttöinen. Halpa.	Vain pintaviat voidaan todeta. Ei voi käyttää tehokkaasti jos liitokset ovat kuumia.	Palkastaa ohutseinäisissä astioissa vuotoja jotka eivät ole paljastuneet tavallisissa ilmalla tehdyissä testeissä. Epäoleelliset pintaolosuhteet (savu, kuona) voivat johtaa väärin tuloksiin.
<b>Ultraääni-tarkastus</b>	Kaupallinen erityislaite, joko pulssikaiku tai siirto tyyppiä. Laitteiston yhteydessä käytetään standardeituvia viitekuvioita tulosten tulkinnessa.	Pintaviat ja pinnanalaiset viat sisältäen sellaiset jotka ovat liian pieniä havaita muilla menetelmillä. Etenkin pinnan alaisten laminaatiovikojen havaitsemiseen.	Hyvin herkkä menetelmä. Sallii tutkia liitoksia, joita ei voi tutkia radiograafisilla menetelmillä.	Vaatii suuren määrän taitoa pulssikaiku kuvioiden tulkitsemisessa. Hitsien jatkuvaa seurantaa ei voi suorittaa helposti.	Pulssikaiku laitteisto on kehitetty erityisesti hitsausliitosten tarkastukseen. Siirtotyyppinen laitteiston tulokset on kuvioidensa puolesta yksinkertaisempia tulkita paikoissa missä se soveltuu.

## 7. HITSIEN LAATU JA HITSAUSVIRHEET

### 7.1 Hitsausliitos

Hitsatun rakenteen päätoiminto on kantaa vaurioitumatta siihen kohdistuvat kuormat. Tämän toiminnon täyttäminen edellyttää, että rakenne ja sen hitsausliitokset ovat riittävän lujia, kestäviä ja sitkeitä niihin asennuksen ja käytön aikana kohdistuvia erilaisia kuormituksia vastaan.

Hitsaus on hitsattavalle materiaalille ja rakenteelle ”raju tapahtuma”, johon liittyvät nopeat lämpötilojen muutokset vaikuttavat materiaalin ominaisuuksiin sekä rakenteen ja liitosten jännitystiloihin. Lämpötila aiheuttaa rakenteeseen helposti muodonmuutoksia ja jälkijännityksiä. Lisäksi hitsausliitosten kohdalla kappaleen geometriassa esiintyy usein epäjatkuvuuskohtia, jotka aiheuttavat jännityskeskittymiä ja -huippuja, jotka erityisesti ovat herkkiä väsyttäville kuormille, mutta aiheuttavat myös staattisissa tilanteissa kuormituksissa ongelmia /29/.

#### Hitsi – rakenteen heikko kohta

Vauriot hitsatuissa rakenteissa lähtevät usein liikkeelle hitsien alueelta. Siihen, että hitsausliitos on ”heikoin lenkki”, on useampia syitä:

- hitsausvirheet
- hitsausjännitykset
- hitsausmuodonmuutokset
- materiaalin ominaisuuksien muuttuminen
- geometrinen epäjatkuvuuskohta.

Edellä mainitut syyt eivät merkitse, että hitsit olisivat ”heikkoja”. Liitosten lujuus- ja sitkeysominaisuudet sekä muut ominaisuudet täyttävät yleensä käyttörasitukset staattisesti kuormitetuissa rakenteissa, mikäli hitsaustyö on tehty huolella ja riittävän virheettömästi, ja siinä on käytetty oikeita lisäaineita ja noudatettu teräksen ja lisäaineen toimittajan hitsausohjeita, mm. lujuuden ja iskusitkeyden kannalta oleellisia lämmöntuontisuosituksia.

Väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa hitsausliitokset heikentävät väsymiskestävyyttä, koska ne edustavat geometrisia epäjatkuvuuskohtia, jotka aina aiheuttavat jännityshuippuja. Näin ollen huolellisestikin valmistettu rakenne saattaa heiketä (”väsyä”) ajan mittaan, jolloin kestoikä jää rajalliseksi. Hitsien väsymislujuutta voidaan parantaa mm. hitsaamalla palot mahdollisimman juoheviksi tai tekemällä hitsauksen jälkeen hitsin ja perusaineen liittyminen juohevaksi esim. hiomalla tai TIG-sulatuksella. Hitsatun rakenteen tulee kestää siihen kohdistuvat kuormitukset riittävällä luotettavuudella ja kaikissa ennakoitavissa tilanteissa. Liitoksessa olevilla mahdollisilla hitsausvirheillä on suuri merkitys hitsausliitosten kestävyydelle. Standardit määrittelevät hyväksymisrajat sekä mekaanisille ominaisuuksille että hitsausvirheille.

Laadunvarmistuksella tarkoitetaan kokonaisvaltaista yrityksen kaikkiin toimintoihin ulottuvaa laadunohjausta. Se alkaa tuotteen suunnittelusta ja päättyy tuotteen toimitukseen asiakkaalle, mahdollisesti tästä vielä eteenpäinkin aina tuotteen käyttöön asti. Yrityksellä voi olla laatujärjestelmä, joka kattaa nämä toiminnot. Viime kädessä laatujärjestelmän hyvyys riippuu kuitenkin siitä kuinka laatua johdetaan.



Hitsaaville yrityksille on hitsauksen laatuvaatimuksia käsittelevä eurooppalainen standardisarja:

#### **SFS-EN 729-1...4: Hitsauksen laatuvaatimukset**

Sarjassa on useampia eritasoisia laatuvaatimuksia, joista yritysjohto voi valita yritykseensä sopivan laatutason:

- osa 2: Kattavat laatuvaatimukset
- osa 3: Vakiolaatuvaatimukset
- osa 4: Peruslaatuvaatimukset.

Viime vuosikymmeninä johtavia ajatuksia ovat teollisuudessa olleet läpimenoaikojen lyheneminen, kustannusten karsiminen, mahdollisimman pieni virheprosentti ja suuri toimintavarmuus. Nämä ovat tuoneet paineita suunnittelijoille, tuotannonohjaukseen, valmistustekniikkaan ja laadunvarmistukseen.

### **7.2 Mikä on hitsausvirhe**

Hitsausvirhe on ”*epäjatkuvuus hitsissä tai poikkeama hitsin muodossa. Hitsausvirheitä ovat esim. halkeamat, vajaa hitsautumissyvyys, huokoisuus ja kuonasulkeumat*”. Hitsausvirheellä tarkoitetaan poikkeamaa ihanteellisesta hitsistä ja hitsausviialla tarkoitetaan sellaista virhettä eli ei-sallittua virhettä, joka on aina korjattava. Yleisterminä käytetään sanaa hitsausvirhe.

Hitsausvirheet syntyvät rakenteiden valmistuksen yhteydessä ja ovat siten erilaisia valmistusvirheitä. Hitsattuihin rakenteisiin voi myös käytössä syntyä vikoja ja vaurioita, joiden syntyyn voivat esimerkiksi aikaisemmat valmistuksessa syntyneet hitsausvirheet olla osallisia.

Hitsausvirheet heikentävät liitoksen kestävyyttä tai muita ominaisuuksia, mistä syystä pyritään yleensä mahdollisimman virheettömään hitsaukseen. Kustannukset ja työn vaikeus kasvavat kuitenkin virheettömyyspyrkimysten myötä. Virheiden esiintyminen hitsausliitoksessa ei välttämättä tee siitä käyttökelvotonta. Aina ei tarvita täysin virheetöntä hitsiä, jos rakenteen kuormitukset ja olosuhteet eivät sitä ehdottomasti vaadi. Tuotannossa vaadittava hitsin laatu-taso sallittuine virheineen osoitetaan hitsiluokalla B, C tai D (SFS-EN 25817).

Teräsrakennusteollisuudessa vaadittu laatutaso on C.

Hitsausvirheistä on julkaistu suomeksi kansainvälinen standardi, jossa määritellään kaikki mahdolliset hitsausvirheet ja annetaan jokaiselle virheelle oma numerotunnus:

SFS-EN ISO 6520-1: Hitsaus ja lähiprosessit – Geometristen hitsausvirheiden luokittelu metallisissa materiaaleissa. Osa 1: Sulahitsaus. 1999

Standardissa hitsausvirheet on ryhmitelty kuuteen pääryhmään:

- halkeamat
- ontelot
- sulkeumat
- liittymisvirheet

- muoto- ja mittavirheet
- muut virheet.

Hitsien NDT-tarkastuksissa käytetään yleensä standardin SFS-EN ISO 6520 mukaisia numerotunnuksia. Vaikka jakoa ei ole tehty standardeissa, hitsausvirheet voidaan jakaa myös karkeasti kolmeen ryhmään:

- muotovirheet
- pintavirheet
- sisäiset virheet.

### 7.3 Hitsausvirheiden vaarallisuus

Tarkastusten avulla konepajoissa pidetään yllä sopivaa laatutasoa, joka on kohtuullisin ponnistuksin saavutettavissa. Tarkastajan on työssään onnistuakseen osattava arvioida myös, millaisia virheitä on mahdollisesti odotettavissa tarkastettavissa hitseissä. Tämä edellyttää tarkastajalta tarkastusmenetelmien tuntemuksen lisäksi myös tietoja mm. eri hitsausprosesseista ja niille tyypillisistä virheistä.

Tarkastuksia ei kuitenkaan tehdä kaikille hitseille tuotteessa, vaan niistä tarkastetaan vain tietty prosenttiosuus esim. hitsien pituudesta. Tarkastuslaajuus vaihtelee huomattavasti kohteen vaativuuden, käyttötarkoituksen, olosuhteiden jne. mukaan. Se annetaan sovellutusstandardissa, viranomais määräyksissä tai sovitaan osapuolten kesken.

Ohjeen B7 /1/ mukaan ”hyvän konepajakäytännön mukaisen” hitsiluokan C vaatimuksena on 10 %:n tarkastuslaajuus, paitsi päittäishitseissä ja läpihitsatuissa T-liitoksissa, missä tarkastuslaajuus riippuu rakenneluokasta ja hitsin hyväksikäyttöasteesta Z (katso B7, taulukko 11.7). Pienahitseissä ja läpihitsaamattomissa päittäis- ja T-liitoksissa hyväksytään yleensä silmämääräinen tarkastus. Jos liitosvirhe tai halkeamisvaara käytetyistä aineesta, ainevahvuudesta tai hitsausmenetelmästä johtuen on ilmeinen, suoritetaan 10 %:n magneettijauhe- tai tunkeumanestetarkastus. Samassa tuotteessa voi hitsiluokka kuten myös tarkastuslaajuus olla erilainen eri hitseille.

Hitsien NDT-tarkastuksissa (Non-destructive testing) eli ainetta rikkomattomassa tarkastuksessa käytetään pääasiassa jotakin tai useampia seuraavista viidestä menetelmästä:

- silmämääräinen tarkastus, VT (Visual Testing)
- tunkeumanestetarkastus, PT (Penetrant Testing)
- magneettijauhetarkastus, MT (Magnetic particle Testing)
- radiograafinen tarkastus, RT (Radiographic Testing)
- ultraäänitarkastus, UT (Ultrasonic Testing)

Tarkastuksista ja hitsausvirheiden hyväksymisrajoista on eurooppalaiset standardit myös suomen kielellä:

*SFS-EN 12062: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Yleisohjeet metallisille materiaaleille*

*SFS-EN 970: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Sulahitsausliitosten silmämääräinen Tarkastus*

*SFS-EN 571-1: Rikkomaton aineenkoetus. Tunkeumanestetarkastus. Osa 1: Yleisperiaatteet*

*SFS-EN 1289: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien tunkeumanestetarkastus. Hyväksymisrajat*

*SFS-EN 1290: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien magneettijauhetarkastus*

*SFS-EN 1291: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien magneettijauhetarkastus. Hyväksymisrajat*

*SFS-EN 1435: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten radiograafinen Kuvaus*

*SFS-EN 12517: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien radiograafinen tarkastus. Hyväksymisrajat*

*SFS-EN 1714: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsausliitosten ultraäänitarkastus*

*SFS-EN 1713: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Ultraäänitarkastus. Hitsausvirheiden tyyppin määrittäminen*

*SFS-EN 1712: Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien ultraäänitarkastus. Hyväksymisrajat*

Perusstandardi SFS-EN 12062 antaa ohjeet tarkastusmenetelmän valintaan ja tarkastustulosten arviointiin perustuen vaatimuksiin, materiaaliin, hitsin paksuuteen, hitsausprosessiin ja tarkastuslaajuuteen. Hitsiluokkastandardin SFS-EN 25817 hitsiluokkia ei voida käyttää sellaisenaan NDT-tarkastuksen hyväksymisrajoina. Standardin SFS-EN 12062 liitteessä on kuitenkin taulukko, jossa annetaan yksittäisten tarkastusstandardien hyväksymisrajojen ja hitsiluokkien välinen yhteys.

Hitsausvirheiden vaikutusten kannalta on vielä tärkeä pinta- ja sisäisten virheiden ryhmittely kaksi- ja kolmiulotteisiin virheisiin. Kaksiulotteinen virhe on tasomainen virhe eli halkeamatyypinen virhe. Koska nämä virheet ovat teräväkärkisiä, ne ovat erityisen vaarallisia virheitä liitoksen kestävyydelle. Tärkeimpiä kaksiulotteisia virheitä ovat:

- erilaiset halkeamat
- liitosvirheet
- vajaa hitsautumissyvyys.

Kolmiulotteinen eli volymetrinen virhe on muodoltaan esimerkiksi pallomainen tai lieriömäinen. Siltä puuttuu kapea terävä kärki, joka tekee virheen erityisen vaaralliseksi.

Tärkeimpiä kolmiulotteisia virheitä ovat:

- huokokset ja muut vastaavat ontelot
- sulkeumat, jos ne eivät ole teräväkärkisiä
- reunahaavat, kun ne ovat pyöreäpohjaisia.

Jos kolmiulotteiset virheet ovat pyöreänmuotoisia, kuten huokokset, niiden vaikutus ilmenee lähinnä poikkipinnan pienentymisenä. Jos hitsissä on hitsausvirhe, se ei vielä tarkoita, että hitsi ja rakenne pitää hylätä. Hitsausvirheen merkitys liitoksen kestävyydelle riippuu mm. virheen luonteesta, liitoksen rasitustavasta, kysymykseen tulevasta vaurioitumistavasta ja virheen sijainnista rasituksen suuntaan nähden.

Hitsausvirheiden vaikutuksista hitsien tai rakenteiden kestävyysarvoihin on olemassa melko vähän tietoa. Toisaalta hitsiluokkastandardia sovellettaessa tiedetään, että hitsausvirheiden ollessa kooltaan tai määrältään enintään tietyn vaatimuksena olevan hitsausluokan rajoissa, rakenteen kestävyys voidaan olettaa vaatimustenmukaiseksi. Täten rakenteita valmistettaessa on ensiarvoisen tärkeää saada riittävästi dokumentoitua tietoa hitseille tehdyistä tarkastuksista ja niihin käytetyistä menetelmistä.

Tietyissä riskialttiissa kantavien rakenteiden liitoksissa ja erityisesti väsytkuormitettujen rakenteiden liitoksissa (tai erikseen sovittaessa) on syytä käyttää hitsiluokkaa B. Tällaisia rakennuskohteita voi esiintyä myös, kun on kyse erittäin laajarunkoisista kantavista rakenteista ja rakennuksista, jotka ovat avoimia yleisölle, ja joissa täten saattaa ajoittain oleskella suuri määrä ihmisiä. Sama voi koskea sellaisia rakenteiden liitoksia, joiden huollettavuus on huono tai joiden kuntoa ei voida tarkastaa.

#### 7.4 Hitsiluokka ja hitsausvirheiden estäminen

Hitsiluokka on tuotannossa valmistettavan hitsin laatua kuvaava tunnus. Hitsiluokkastandardi ei määrittele hitsiluokan valintaa, vaan sen tekee rakenteen suunnittelija (tai rakennushankkeeseen ryhtyvä taho) ennen tuotannon (rakentamisen) alkua, tai joissakin tapauksissa se annetaan erikseen noudatettavassa sovellutusstandardissa. Eri hitsausvikatyypeille sallitut arvot ao. hitsiluokkastandardissa ovat staattisessa kuormitustapauksessa likimain suhteessa niiden merkitykseen liitoksen kestävyydelle murtumismekaniikan kannalta.

Terästen hitsiluokista on julkaistu eurooppalainen standardi: *SFS-EN 25817: Terästen kaarihitsaus. Hitsiluokat / II/*.

Standardissa hitsit on jaettu sallittavien hitsausvirheiden ja niiden koon perusteella kolmeen eri hitsiluokkaan:

*D: tyydyttävä*

*C: hyvä*

*B: vaativa*

Luokka D on selvästi sallivampi eri hitsausvirheille kuin luokat C ja B. Luokkien C ja B välinen ero on enemmänkin siinä, kuinka suurina ja miten paljon tiettyjä virheitä sallitaan.

Väsyttävästi kuormitetuille rakenteille valitaan yleensä vaativin hitsiluokka B ja staattisesti kuormitetuille rakenteille usein luokka C. Luokkaa D ei saa käyttää rakentamisessa kuormaa kantavissa liitoksissa. Luokan C voidaan sanoa edustavan ”hyvää konepajakäytäntöä”, mutta myös luokassa C on eräät virhetyypit kokonaan kielletty rakentamisessa. Standardissa on virheille annettu sinänsä mielivaltainen tunnusnumero, ja lueteltu ne järjestyksessä 1–26. Kullekin virheelle on annettu mittojen raja-arvot eri hitsiluokissa D, C ja B. Standardin käyttämät tunnusnumerot ovat siis eri kuin ISO 6520:n tunnuksat, vaikkakin kunkin virheen kohdalla on viittaus myös ISO 6520:n tunnusnumeroon. Hitsiluokkastandardin virheet ovat numerojärjestyksessä (suluissa ISO 6520 mukaisia virheiden numeroita):

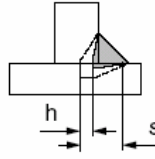
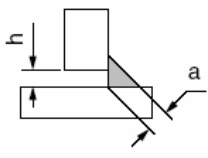
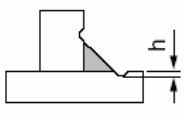
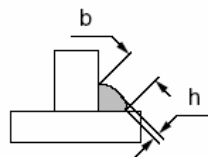
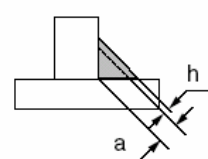
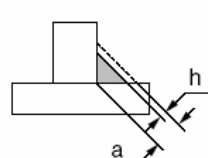
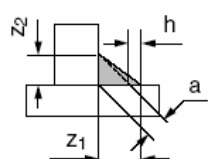
- 1 Halkeamat (100)
- 2 Kraatterihalkeamat (104)
- 3 Huokokset (2011, 2012, 2014, 2017)
- 4 Huokosryhmä (2013)
- 5 Pitkänomaiset huokokset (2015, 2016)
- 6 Sulkeumat, muut kuin kuparisulkeumat (300)
- 7 Sulkeumat. Kuparisulkeumat (3042)
- 8 Liitosvirhe (401)
- 9 Vajaa hitsautumissyvyys (402)
- 10 Sovitusvirhe pienahitsissä (–)
- 11 Reunahaava (5011, 5012)
- 12 Korkea kupu päittäishitsissä (502)
- 13 Korkea kupu pienahitsissä (503)
- 14 Ylisuuri a-mitta pienahitsissä (5214)
- 15 Vajaa a-mitta pienahitsissä (5213)
- 16 Korkea juurikupu (504)
- 17 Paikallinen juuren valuma (5041)
- 18 Sovitusvirhe (507)
- 19 Vajaa kupu (511) ja vajonnut hitsi (509)
- 20 Kateettipoikkeama (512)
- 21 Vajaa juuri ja reunahaava juuressa (515, 5013)
- 22 Pintapalon valuma (506)
- 23 Uudelleenaloitusvirhe (517)
- 24 Sytytysjälki (601)
- 25 Roiskeet (602)
- 26 Useat virheet samassa poikkileikkauksessa (–).

### **Hitsausvirheet – syyt ja estäminen**

Standardissa SFS-EN ISO 6520-1 virheet on ryhmitelty kuuteen ryhmään:

- 1 halkeamat*
- 2 ontelot*
- 3 sulkeumat*
- 4 liittymisvirheet*
- 5 muoto- ja mittavirheet*
- 6 muut virheet*

**Taulukko 10.** Pienahitsien hitsausvirheiden toleranssit.

Virhetyyppi		Hitsausluokka (EN 25817)		
		D Tyydyttävä	C Hyvä	B Vaativa
9. Vajaa hitsautumissyvyys <sup>1)</sup>		Lyhyet virheet <sup>2)</sup> $h \leq 0,2s$ max 2 mm Pitkät virheet <sup>3)</sup> Ei sallita	Lyhyet virheet <sup>2)</sup> $h \leq 0,1s$ max 1,5 mm Pitkät virheet <sup>3)</sup> Ei sallita	Virheitä ei sallita
10. Sovitusvirhe <sup>1)</sup>		$h \leq 1\text{ mm} + 0,3a$ max 4 mm <sup>1)</sup>	$h \leq 0,5\text{ mm} + 0,2a$ max 3 mm <sup>1)</sup>	$h \leq 0,5\text{ mm} + 0,1a$ max 2 mm
11. Reunahaava <sup>1)</sup>		$h \leq 1,5\text{ mm}$	$h \leq 1,0\text{ mm}$	$h \leq 0,5\text{ mm}$
13. Korkea kupu		$h \leq 1\text{ mm} + 0,25b$ max 5 mm	$h \leq 1\text{ mm} + 0,15b$ max 4 mm	$h \leq 1\text{ mm} + 0,1b$ max 3 mm
14. Ylisuuri a-mitta		$h \leq 1\text{ mm} + 0,3a$ max 5 mm	$h \leq 1\text{ mm} + 0,2a$ max 4 mm	$h \leq 1\text{ mm} + 0,15a$ max 3 mm
15. Vajaa a-mitta		Lyhyet virheet <sup>2)</sup> $h \leq 0,3\text{ mm} + 0,1a$ max 2 mm Pitkät virheet <sup>3)</sup> Ei sallita	Lyhyet virheet <sup>2)</sup> $h \leq 0,3\text{ mm} + 0,1a$ max 1 mm Pitkät virheet <sup>3)</sup> Ei sallita	Virheitä ei sallita
20. Kateetti-poikkeama		$h \leq 2\text{ mm} + 0,2a$	$h \leq 2\text{ mm} + 0,15a$	$h \leq 1,5\text{ mm} + 0,15a$

<sup>1)</sup> Suomessa käytetään B-luokan vaatimuksia kaikissa hitsausluokissa [7]  
<sup>2)</sup> Lyhyt hitsausvirhe on yksi tai useampi hitsausvirhe, joiden kokonaispituus on enintään 25 mm 100 mm hitsin pituudesta tai enintään 25 % hitsin pituudesta, kun hitsin pituus on alle 100 mm.  
<sup>3)</sup> Pitkä hitsausvirhe on yksi tai useampi hitsausvirhe, joiden kokonaispituus ylittää 25 mm 100 mm hitsin pituudesta tai vähintään 25 % hitsin pituudesta, kun hitsin pituus on alle 100 mm.

Virheiden syyt ja estämistoimenpiteet ovat pakostakin yleisluontoisia. Ne vaihtelevat tapauskohtaisesti ja lisäksi eri hitsausprosessien kesken, joten oikean syyn ja estämistoimenpiteen löytäminen edellyttää hyviä perustietoja hitsauksesta.

Erityisesti pienahitsien osalta (kts. taulukko 10) eräät toleranssit ja virheet ovat sellaisia, joiden toteutumista ei voi valvoa silmämääräisesti. Sellaisia ovat "vajaa hitsautumissyvyys" ja

"sovitusrvirhe". Kumpikin tilanne on hitsiliitoksen kestävyuden suhteen kriittisellä polulla, eli hitsaustyön laadun valvonta tulee kuormaa kantavissa liitoksissa ulottaa koskemaan juuri näiden NDT-menetelmillä testaamattomien virheiden välttämistä. Samoin hitsaajien koulutuksessa tulee korostaa tällaisten virhemahdollisuuksien olemassaoloa ja keinoja välttää niitä.

Teräsrakenteiden suunnitteluohjeessa B7 /1/ on kohdassa 11.3.4 käsitelty teräsrakenteiden laadunvarmistustoimenpiteiden dokumentointia:

”Rakennuskohteen teräsrakenteita koskeva laatuaineisto kootaan laatupassiin, ja sen tulee sisältää rakenneluokittain vähintään taulukossa 11.10 luetellut asiakirjat:”

**Taulukko 11.10**  
Laatupassin sisältö

Laatupassin vaihe	Laatupassin sisältö rakenneluokittain	Rakenneluokka		
		1	2	3
Suunnittelu asiakirjoista	Projektieritelmä	x	x	x
Ennen työn aloittamista	Laatusuunnitelma	x	x	
	Hitsaussuunnitelma	x	x	x
	Tarkastussuunnitelma	x	x	x
	Hitsaajien pätevyystodistukset	x	x	x
	NDT-tarkastajien pätevyystodistukset	x	x	x
Ennen asentamista	Asennussuunnitelma	x	x	x
	Ainestodistukset ja varmennettujen käyttöselosteiden numerot	x	x	x
	Hitsausaineiden todistukset	x	x	
	Ruuvien ja muttereiden ainestodistukset tai varmennettujen käyttöselosteiden numerot	x	x	x
	Hitsien tarkastuspöytäkirjat	x	x	x
	NDT-tarkastusten pöytäkirjat	x	x	x
	Valmisosien tarkastuspöytäkirjat	x	x	
	Pinnoitteiden tarkastuspöytäkirjat	x	x	
Ennen runkokatselmusta tai luovutusta	Asennushitsien tarkastuspöytäkirjat	x	x	x
	Pulttiliitosten tarkastuspöytäkirjat	x	x	
	Rungon tarkemittauspöytäkirjat	x	x	
	Todennus rungon vastaavan suunnitelmia	x	x	x

Lisäksi ohjeen B7 kohdassa 11.4 on käsitelty toimenpiteitä epätydyttävän laadun takia:

”Epätydyttävän laadun ollessa kyseessä selvitetään käytettävissä olevan laadunvalvonta-aineiston perusteella epätydyttävän laadun esiintymiskohdat ja syyt. Kun kyseessä on aineiden ja tarvikkeiden epätydyttävä laatu, selvitetään tarvittavat ominaisuudet valmiista rakenteista otetuilla näytteillä. Valmiin rakenteen mittapoikkeamien merkitys voidaan yleensä selvittää laskennallisesti. Käytössä olevan aineiston perusteella tehdään selvitys siitä, millaisin toimenpitein rakenne saadaan hyväksyttävään kuntoon.

Rakenteen kestävyys voidaan todeta myös koekuormituksella.”

Hankkeeseen ryhtyvän tahon edunvalvonnan kannalta on olennaista, että rakentamisen aloituskokouksessa luodaan pelisäännöt mitä tehdään, jos epätydyttävää laatua havaitaan. Samoin hankkeeseen ryhtyvän kannalta on tarvittavien toimenpiteiden kustannusten takia oleellisen tärkeää, että laatupuutteesta raportoidaan heti kun havainto laatupuutteesta on tehty.

**Lähdeteokset:**

1. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B7. Teräsrakenteet. Ympäristöministeriö. Ohjeet 1988.
2. ENV 1993-1-1. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for building. 344 s.
3. EN 1990. Eurocode. Basis of Design and Actions on Structures. Part 1: Basis of Design. ENV 1990-1. CEN/TC250. 1993. 76 s.
4. EN 1991-1. Eurocode 1. Execution of steel structures - Part 1: General rules and rules for buildings.
5. SFS 2373. Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. 38 s.
6. SFS 2378. Hitsaus. Väsyttävästi kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. 51 s.
7. Leino, T. Liitoputkipilarien ja THQ-palkkien liitoskokeet. Raportit RTE30201/95, RTE70228/94 ja RTE70401/94. VTT Rakennustekniikka. Espoo, 1995, 38+83 s.
8. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa A1. Rakennustyön valvonta. Määräykset ja ohjeet 2000.
9. Suomen rakennusmääräyskokoelma. Kansallinen sovellusasiakirja koskien esistandardia SFS-ENV 1991-1. Ympäristöministeriö.
10. Leino, T., Häkkä-Rönholm, E., Nieminen, J., Koukkari, H., Hieta, J., Vesikari, E. ja Törnqvist, J. Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1937. 119 s. + liitt. 11 s.
11. SFS-EN 25817. Hitsaus. Terästen kaarihitsaus. Hitsiluokat. 20 s (Aiempi vastaava standardi oli SFS-EN ISO 5817).
12. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa A2. Rakennuksen suunnittelijat ja suunnitelmat. Ympäristöministeriö, luonnos maaliskuu 2001.
13. VTT Rakennustekniikka, Liikuntapaikkojen rakenteiden tehostettu tarkastustoiminta; rakenteellinen turvallisuus. Projektiraportti nro RTE30690/97.
14. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B6. Teräsohutlevyrakenteet. Ohjeet 1989. Ympäristöministeriö.
15. RIL 144-2002. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 2002, 205 s.
16. RIL 167-1, -2 ja -3. Teräsrakenteet I, II ja III. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 1988.




17. TRY Teräsnormikortti N:o 18/2005. Hitsausliitosten laadunvarmistus ohjeiden B7 mukaan. 11 s.
18. Teräsrakenneyhdistys ry. TSP - Teräsrakenteiden suunnittelun uudet pelisäännöt. Projektiraportti 1990.
19. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa B11. Kantavien rakenteiden työnjohto. Määräykset ja ohjeet 2000. Ympäristöministeriö, luonnos maaliskuu 2001.
20. EN 1991-1-7: Eurocode 1 - Actions on structures. Part 1-7: General actions - Accidental actions. 66 s.
21. Niemi, E. Levyrakenteiden suunnittelu. Tekninen tiedotus 2. 2003. Teknologiateollisuus. 134 s.
22. prEN 1991-1-6. Eurocode 1 - Actions on structures. Part 1-6: General actions - Actions during execution. 29 s.
23. Rautaruukin putkipalkkikäsikirja. Metform. Hämeenlinna 1997. 345 s.
24. Kalamies, U. Teräsrakenteiden toteutuksen uudet standardit prEN 1090-1 ja prEN 1090-2. Teräsrakenne 2 / 2005. s. 38-41
25. Guide For Service Life Design Of Buildings. ISO TC 59/ SC3/ WG9 Draft 2: November 1995.
26. Guide For Service Life Design Of Buildings. ISO/CD 15686-1. ISO TC 59/ SC14 Draft 3: 1997.
27. EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Osa 1-8: Design of joints.
28. EN 1993-1-10. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties. 16 s.
29. Lukkari Juha. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. Hitsausuutisissa julkaistut artikkelit, osat 1–5. Juha Lukkari. OY ESAB

## LIITE 1

## Hitsien mitoitus esimerkki 1

Ohessa on laskettu standardissa SFS 2373 esitetty esimerkki 1. hieman muunneltuna (kaksi samanlaista pienahitsiä) käyttäen osavarmuuslukujen menettelyä (SFS-EN 1993-1-8:2005). Muuttujien merkinnät ja kaavojen vakio-termit on muutettu vastaamaan Suomen soveltamisohjeen valintoja.

## HITSIEN KESTÄVYYDEN LASKENTA "TARKAN" MENETELMÄN MUKAAN

<p>Ulkoinen vetovoima <math>F_{Ek} = 95 \text{ kN}</math> (hyötykuormaa, ominaisarvo)</p> <p>Kokonaisrasitus (murtorajatilan mitoituskuorma) <math>F_{Ed}</math> on</p> $F_{Ed} = \sum \gamma_F \cdot F_{Ek} = 1,5 \cdot 95 \text{ kN}$ $= 142,5 \text{ kN}.$	
<p>Mitoitus, lähtötietoina käytetään:</p> <p>Teräslaji: S355J2, <math>f_y = 355 \text{ N/mm}^2</math> ja <math>f_u = 490 \text{ N/mm}^2</math> (on minimiarvo, kun levyn paksuus on välillä 3...100 mm).</p> <p>Vetomurtolujuudelle voi joissakin tapauksissa osoittaa olevan suurempi arvo, katso standardista EN 10025!</p> <p>Hitsin pituus: <math>l = 50 \text{ mm}</math>, Levyjen paksuudet <math>s = 10 \text{ mm}</math>.</p> $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l}$ $\Rightarrow \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} = 2 \cdot \sigma_{\perp} = \frac{F_{Ed}}{\sqrt{2} \cdot a \cdot l}$ <p>Huom! Kaksi hitsiä.</p>	<p>Mitoitusehdot:</p> <p>1) <math>\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}</math> ja 2) <math>\sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot f_u / \gamma_{M2}</math></p> <p>missä <math>\gamma_{M2} = 1,25</math> (materiaaliosavarmuusluku) ja kerroin <math>\beta_w = 0,9</math> teräkselle S355.</p> <p>Ehdoista saadaan ratkaistuksi a-mitalle vähimmäisarvoksi:</p> <p>Ehto 1: <math>\frac{F_{Ed}}{\sqrt{2} \cdot a \cdot l} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}</math>, mistä</p> $a \geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot F_{Ed}}{\sqrt{2} \cdot l \cdot f_u} = \frac{0,9 \cdot 1,25 \cdot 142,5 \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 490} = 4,63 \text{ mm}$ <p>Ehto 2: <math>\frac{F_{Ed}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}</math>, mistä</p> $a \geq \frac{\gamma_{M2} \cdot F_{Ed}}{0,9 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot f_u \cdot l} = \frac{1,25 \cdot 142,5 \cdot 10^3}{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 490 \cdot 50} = 2,86 \text{ mm}$ <p>Tulee valita: <math>a = 5 \text{ mm}</math>.</p>

Standardissa SFS 2373 esitetyn yhden hitsin liitoksen sijasta tässä esimerkissä on käsitelty kahden hitsin vaihtoehtoa. Standardissa on kohdassa 6.3K todettu, että yhden ainoan suoran pienahitsin käyttö ei ole suotavaa, koska sen lujuus hitsin pituusakselin ympäri taivuttavan momentin suhteen jää todellisuudessa melko huonoksi. Yksinkertaisen liitoksen hitsin juuri on hankala tarkastaa, ja se on altis alkusärölle joka saattaa vedossa johtaa helposti haurasmurtumaan.

### Esim. 1 - KESTÄVYYS YKSINKERTAISTETUN MENETELMÄN MUKAAN

Pienahitsien kestävyys voidaan todeta riittäväksi yksinkertaistetulla menetelmällä, jos hitsin pituudella sen leikkauksessa siirrettyjen voimien resultantti yksikköpituutta kohden toteuttaa seuraavan yhtälön (riippumatta hitsin määrävän tason suunnasta verrattuna kuormitusten resultanttiin):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad , \quad \text{kun } F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad , \quad \text{missä } f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}}$$

missä

$F_{w,Ed}$  on hitsissä vaikuttavien voimien resultantin mitoitusarvo yksikköpituutta kohden, ja

$F_{w,Rd}$  on hitsin kestävyuden mitoitusarvo yksikköpituutta kohden.

$f_{vw,d}$  on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo ja

Pituus  $a$  on pienahitsin  $a$ -mitta ja vakiot  $\beta_m$  ja  $\gamma_{M2}$  on määritelty kuten edellä.

Hitseissä (2 kpl, pituus  $l = 50\text{mm}$ ) vaikuttavien voimien resultantin mitoitusarvo hitsin yksikköpituutta kohden saadaan:

$$\begin{aligned} F_{w,Ed} &= F_{Ed} / (2 \cdot l) \\ &= 142,5 \text{ kN} / 100 \text{ mm} \\ &= 1425 \text{ N} / \text{mm} \\ &< 1508,82 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 251,47 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$a = 5, \text{ joten } F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 1257,35 \text{ N} / \text{mm}$$

$$a = 6, F_{w,Rd} = 1508,82 \text{ N} / \text{mm}$$

=> Yksinkertaistetun menettelyn mukaan hitsien  $a$ -mitaksi joudutaan valitsemaan  $a = 6 \text{ mm}$  !

Laskentamenetelmien ero  $a$ -mitoissa selittyy sillä, että yksinkertaistetussa menetelmässä vertailu suoritetaan levyn suuntaisilla voimilla ja jännityksillä. Hitsin leikkauslujuuden laskenta-kaavassa oleva termi  $\sqrt{3}$  alikompensoi vastaavan perusmitoitusmenetelmästä mitoitusuhdon 1 kaavasta tulevan termin  $\sqrt{2}$ . Vertailu:

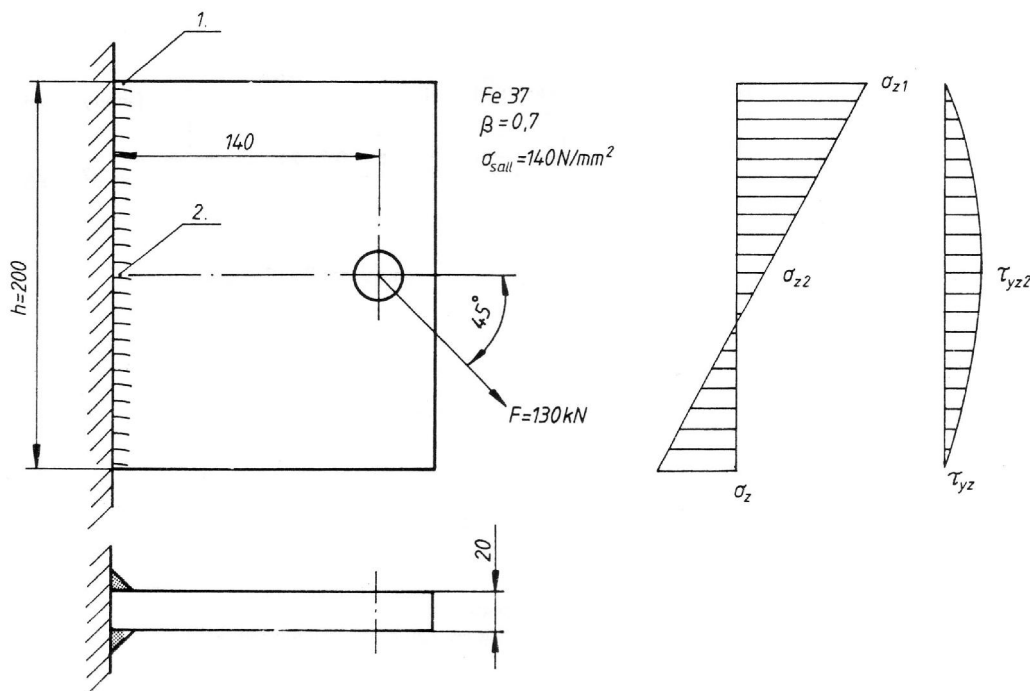
$$\frac{F_{Ed}}{\sqrt{2} \cdot a \cdot l} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_{Ed}}{2 \cdot l} \leq \frac{f_u / \sqrt{2}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot a \quad \text{vrt. } f_{vw,d} \cdot a = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

Täten yksinkertaistettu menetelmä antaa enimmillään suhteen  $\sqrt{3} / \sqrt{2} = 1,22$  verran (22 %) suurempia  $a$ -mittoja. Ero on pienimmillään puhtaasti leikkausrasitetuissa pienahitseissä.

## Hitsiliitoksen mitoitus esimerkki 2

Ohessa on laskettu standardissa SFS 2373 esitetty esimerkki 7 käyttäen osavarmuuslukujen menettelyä (SFS-EN 1993-1-8:2005). Kaavoissa merkinnät ja vakiotermit on muutettu vastaamaan Suomen soveltamisasiakirjassa esitettyjä arvoja. Kuva ja sen merkinnät ovat standardista SFS 2373.

Huom! Korvakkeen liitos voidaan ohjeen mukaan mitoittaa ainoastaan siinä tapauksessa, että taivutusmomentista aiheutuu LINEAARISESTI MUUTTUVA jännitystila (jos kiinnityskohta on riittävän jäykkä!), jolloin mitoituksessa voidaan tarkastella hitsin yksittäisiä leikkauksia.



Ulkoinen vetovoima  $F_{Ek} = 130 \text{ kN}$  ( $F$ ) kulmassa  $\alpha=45$  astetta (hyötykuormaa, ominaisarvo). Kokonaisrasitus murtorajatilassa on  $F_{Ed}$ :

$F_{Ed} = \sum \gamma_F \cdot F_{Ek} = 1,5 \cdot 130 \text{ kN} = 195 \text{ kN}$   
mistä voimakomponentit ovat: Veto-  
voima = leikkausvoima:

$$F_{Ed,\perp} = F_{Ed,\parallel} = F_{Ed} \cdot \cos 45 = 137,886 \text{ kN}$$

Leikkausvoimakomponentista  $F_{Ed,\parallel}$  aiheutuu hitsausliitokseen myös taivutusmomentti, eli hitsausliitoksen vetojännitystila ei ole vakio:

$$M_{Ed} = F_{Ed,\parallel} \cdot d = 19,3 \text{ kNm}$$

Huom! Hitsit molemmin puolin.  
Hitsin pituus:  $h = 200 \text{ mm}$ .

### Mitoituksen lähtötiedot:

Teräs: S235J2,  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$  ja vetomurtolujuus

$f_u = 340 \text{ N/mm}^2$  (minimiarvo, kun levyn paksuus on välillä 3...100 mm.  $\beta_w = 0,9$ .

Vetomurtolujuudelle voidaan joissakin tapauksissa osoittaa myös suurempi arvo, katso standardista EN 10025!)

voiman vaikutuspisteen etäisyys  $d = 140 \text{ mm}$ ,  
ja korvakelevyn paksuus  $s = 20 \text{ mm}$ .

Ympärihitsatun kiinnikkeen yläpinnan yläpuolisia tai alapinnan alapuolisia hitsejä ei saa ottaa mitoituksessa huomioon. Ko. hitsien pituudet ovat (vaakasuunnassa) alle 50 mm. Suunnitteluohjeiden mukaan ympäri hitsausta ei saa aloittaa korvakkeen kulmasta!

Laskelmien helpottamiseksi merkitään:

$$F_{Ed,\perp} / (2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l) = f / a = 243,75 / a$$

Olettaen lineaarisesti muuttuva jännitys-tila, hitsin mitoitus pitää tehdä erikseen korvakkeen ylä- tai alapinnoissa sekä sen neutraaliakselin kohdalla. Korvakkeen taivutusvastus on

$$W = s \cdot h^2 / 6$$

$$= 20 \cdot 200^2 / 6 = 1,333 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow M_{Ed} / W = 154,425 \text{ N / mm}^2$$

Mitoitusehdot:

$$1) \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$= \frac{340}{0,9 \cdot 1,25} = 302,22 \text{ N / mm}^2 \text{ ja}$$

$$2) \sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

$$= 0,9 \cdot 340 / 1,25 = 244,8 \text{ N / mm}^2$$

missä  $\gamma_{M2} = 1,25$  (materiaaliosavarmuusluku).

Kerroin  $\beta_w = 0,9$  teräkselle S355.

### A. Yläpinnassa

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{Ed,\perp}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l} + \frac{M_{Ed}}{W} = \frac{f}{a} + \frac{M_{Ed}}{W}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{Ed,\perp}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l} = \frac{f}{a}$$

ja  $\tau_{\parallel} = 0$ .

$$\Rightarrow \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2)}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{f}{a} + \frac{M_{Ed}}{W}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{f}{a}\right)^2}$$

Laskelmat on yksinkertaisinta suorittaa kokeilemalla eri a-mittoja ehtojen 1) ja 2) epäyhtälöihin:

$$\sqrt{\left(\frac{f}{a} + \frac{M_{Ed}}{W}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{f}{a}\right)^2} \leq 302,22 \text{ N / mm}^2$$

Eri a – mitoilla eliöjuuren arvoksi saadaan :

a	$\sigma_{\perp}$	$\sqrt{\left(\frac{f}{a} + \frac{M_{Ed}}{W}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{f}{a}\right)^2}$
4	215,36	239,84
5	203,18	220,02
6	195,05	207,35
7	189,25	198,62

$\Rightarrow$  Pienahitsin minimi a-mitta = 4 mm riittää.

**B. Neutraalitasossa** taivutusmomentin  $M_{Ed}$  aiheuttama jännitys = 0, jolloin jännityskomponentit tulevat veto ja leikkausvoimista:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed,\perp}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l} = \frac{f}{a}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{Ed,\parallel}}{2 \cdot a \cdot l} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{F_{Ed,\parallel}}{2\sqrt{2} \cdot a \cdot l}$$

$$= \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \frac{f}{a} \text{ Saadaan :}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

$$= \frac{f}{a} \sqrt{1 + 3\left(1 + \frac{9}{2}\right)} = 4,183 \cdot \frac{f}{a}$$

Ehdoista 1) ja 2) saadaan a-mitalle ratkaistuksi vähimmäisarvo:

$$\sqrt{\left(\frac{f}{a}\right)^2 + 3 \cdot \left[\left(\frac{f}{a}\right)^2 + \left(\frac{3 \cdot f}{\sqrt{2} \cdot a}\right)^2\right]} \leq 302,22 \text{ N / mm}^2$$

Eri a – mitoilla eliöjuuren arvoksi saadaan :

a	$\sigma_{\perp}$	$\sqrt{\left(\frac{f}{a}\right)^2 + 3 \cdot \left[\left(\frac{f}{a}\right)^2 + \left(\frac{3 \cdot f}{\sqrt{2} \cdot a}\right)^2\right]}$
4	60,94	254,91
5	48,75	203,92

$\Rightarrow$  Pienen koko pitää olla a = 4 mm.

## Esim. 2 - KESTÄVYYS YKSINKERTAISTETUN MENETELMÄN MUKAAN

Pienahitsien kestävyys voidaan todeta riittäväksi yksinkertaistetulla menetelmällä, jos hitsin pituudella sen leikkauksessa siirrettyjen voimien resultantti yksikköpituutta kohden toteuttaa seuraavan yhtälön (riippumatta hitsin määrävän tason suunnasta verrattuna kuormitusten resultanttiin):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad , \quad \text{kun } F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad , \quad \text{missä } f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}}$$

missä

$F_{w,Ed}$  on hitsissä vaikuttavien voimien resultantin mitoitusarvo yksikköpituutta kohden, ja

$F_{w,Rd}$  on hitsin kestävyuden mitoitusarvo yksikköpituutta kohden.

$f_{vw,d}$  on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo ja

Pituus  $a$  on pienahitsin  $a$ -mitta ja vakiot  $\beta_m$  ja  $\gamma_{M2}$  on määritelty kuten edellä. Mikäli korvake hitsataan riittävän jäykkään seinämään, mitoitusohjeen pätevät, ja vertailuarvot yksinkertais-  
tudessa menetelmässä lasketaan esimerkiksi alla esitetyllä tavalla.

Hitseissä (2 kpl) vaikuttavien voimien resultantin mitoitusarvo hitsin yksikköpituutta kohden voidaan laskea korvakeen hitseihin vaikuttavasta voimasta. Saadaan:

$$\begin{aligned} F_{w,Ed} &= F_{Ed} / (2 \cdot l) \\ &= 195,0 \text{ kN} / 400 \text{ mm} \\ &= 487,5 \text{ N} / \text{mm} \end{aligned}$$

Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}} = \frac{340 / \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 174,48 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$a = 4, \text{ joten } F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 697,95 \text{ N} / \text{mm}$$

$$a = 5, F_{w,Rd} = 872,44 \text{ N} / \text{mm}$$

=> Yksinkertaistetun menettelyn mukaan hitsien  $a$ -mitaksi riittää  $a = 4 \text{ mm}$ !

**Huom!** Perusmitoitusmenetelmän ja yksinkertaistetun menetelmän välillä syntyy tässä esimerkissä pieni ero leikkausjännitysten laskentatavasta. Perusmitoitusmenetelmässä lähdetään todellisista jännityksistä hitseissä, jolloin kuvassa näkyvän leikkausjännitysten jakautuman perusteella tulee lujuusopillisia syistä soveltaa pisteessä 2 kerrointa 3/2 verrattuna siihen, että leikkausvoima jaettaisiin tasan hitseille niiden päästä päähän. Sama  $a$ -mitta saadaan, jos tehtävään sovelletaan kohdassa 5.2 esitettyä  $a$ -mitan laskentakaavaa:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Ed,\perp}}{h \cdot t} = \frac{137886}{20 \cdot 200} = 34,4715 \text{ M} / \text{mm}^2 \quad \tau_{yz,Ed} = \frac{3}{2} \cdot \sigma_{z,Ed} = 51,71 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$\text{Saadaan: } a \geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t}{2 \cdot f_u} \cdot \sqrt{2\sigma_{z,Ed}^2 + 3\tau_{yz,Ed}^2} = \frac{0,9 \cdot 1,25 \cdot 20}{2 \cdot 340} \sqrt{2 \cdot 34,47^2 + 3 \cdot 51,71^2} = 3,37 \text{ mm}$$

### Hitsien mitoitusesimerkki 3

Ohessa on laskettu standardissa SFS 2373 esitetty esimerkki 8 hieman muunneltuna käyttäen osavarmuuslukujen menettelyä (SFS-EN 1993-1-8:2005). Muuttujien merkinnät ja kaavojen vakiotermit on muutettu vastaamaan Suomessa sovellettavia ohjeita. Esimerkissä käytetyn profiilin, HE200B, korkeus on 200 mm, leveys 200 mm, uuman paksuus on 9 mm ja teräslaji on S235.

Ulkoiset ominaiskuormat (suluissa kuormaosavarmuusluvut eurokoodien mukaan):

Taivutusmomentti  $M = \pm 60 \text{ kNm}$  (1,5),  
 Aksiaalivoima  $N_{\max} = 150 \text{ kN}$  (1,5),  
 (omapaino)  $N_{\min} = 40 \text{ kN}$  (0,9),  
 Leikkausvoima  $V = \pm 50 \text{ kN}$  (1,5).

**Mitoitusarvot** (kerrottu EC-osavarmuusluvuilla, edellä suluissa) ovat:

Taivutusmomentti  $M_{Sd} = \pm 90 \text{ kNm}$ ,  
 Aksiaalivoima  $N_{Sd, \max} = 225 \text{ kN}$ ,  
 (omapaino)  $N_{Sd, \min} = 36 \text{ kN}$ ,  
 Leikkausvoima  $V_{Sd} = \pm 75 \text{ kN}$ .

Kokonaisrasitus  $F_{Ed}$  ( $F_{Sd}$  vastaa ohjeen EN 1993-1-8 mukaista merkintää  $F_{Ed}$ )

- Laipan hitsit mitoitetaan sen suurimman vetovoiman mukaisesti, ilman leikkausvoiman vaikutusta, ja
- Uuman hitsin mitoitetaan sen vedetyn laipan puoleisessa päässä vaikuttavien veto- ja leikkausvoimien perusteella.

Laippojen neutraaliakselien välinen etäisyys on  $h_f = 200 - 15 = 185 \text{ mm}$ .

Tarvitaan kaksi kuormitusyhdistelmää:

- Laipan hitsien mitoitus voimalle:

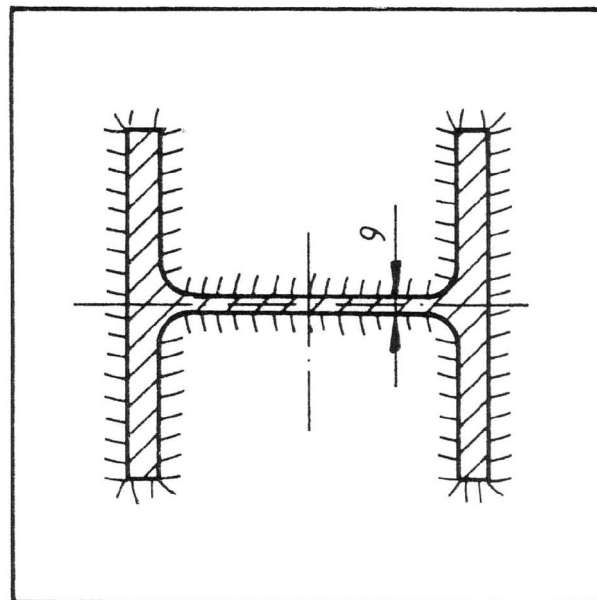
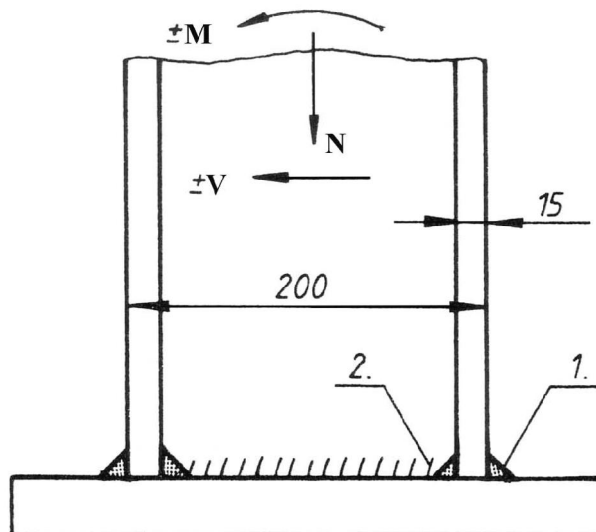
Suurin taivutusmomentti – omapaino:

$$F_{Ed} = M_{Sd} / h_f - N_{Sd, \min} / 2 = 90 / 0,185 - 54 / 2 = 468,49 \text{ kN}$$

- Uuman hitsien mitoitus:

Suurin vectorasitus tulee taivutusmomentista ja vetovoimasta kuten edellä. Otetaan huomioon kaarevuussäde  $r$  uuman liittyessä laippaan.

Suurin leikkausvoima:  $F_{Ed} = 75 \text{ kN}$



**Huom!** Mikäli pohjalevy on ohut eikä siinä käytetä jäykisteitä, laippojen hitsien ei voi olettaa siirtävän mahdollista pilarin heikomman suunnan taivutusmomenttia.

**Mitoitus,**

Hitsien pituudet:

- laippa:  $l = 200 \text{ mm}$  (2 kpl),
- uuma:  $l = 200 - 2 \cdot 15 = 170 \text{ mm}$  (2 kpl)

Muina lähtötietoina käytetään:

Teräs: S235J2,

 $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$  ja $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$  (on nimellinen, tai minimiarvo, kun levyn paksuus välillä 3...40 mm).

Vetomurtolujuudelle voi joissakin tapauksissa osoittaa olevan suurempi arvo, katso standardista EN 10025!

Mitoitusehdot staattisesti epämääräiselle hitsausliitokselle:

$$1) \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{ja}$$

$$2) \sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

missä  $\gamma_{M2} = 1,25$  (materiaaliosavarmuusluku).Kerros  $\beta_w = 0,8$  teräkselle S235.**Lisäehto:** Staattisesti epämääräisissä hitsausliitoksissa hitsin lujuuden tulee olla parempi kuin 80 % heikoimman liitettävän osan kestävyuden mitoitustarvosta.**Laipan hitsit** (kuvitellaan, että hitseihin vaikuttaa vetovoima  $F_{Ed} / 2$ , vaikka ne ovat laipan eri puolilla ja  $\tau_{\parallel} \approx 0$ ):

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{Ed}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot l}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} = 2 \cdot \sigma_{\perp} = \frac{F_{Ed}}{\sqrt{2} \cdot a \cdot l}$$

$$\leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

 $\Rightarrow$  saadaan ehdot ( $L_f = l$ )

$$1) \sqrt{2} \cdot f_u \cdot a \cdot l \geq \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot F_{Ed}$$

josta saadaan a-mitalle ehto:

$$a \geq \frac{0,8 \cdot 1,25 \cdot 468490}{\sqrt{2} \cdot 360 \cdot 200} = 4,6 \text{ mm}$$

2) jännityskomponentille  $\sigma_{\perp}$  saadaan raja-arvoksi:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{Sd}}{\sqrt{2} \cdot a \cdot L_f} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot L_f \cdot f_u \geq \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot F_{Ed}$$

$$\text{saadaan } a \geq 5,1 \text{ mm}$$

 $\Rightarrow$  Laippojen hitsit pitää valita  $a = 6 \text{ mm}$ .**Laippojen hitsit**, kun otetaan huomioon muodonmuutoskykyvaatimus:

Suurin vetojännitys laipan keskellä on:

$$\sigma_z = \frac{M_{Sd} \cdot e}{I_x} - \frac{N_{Sd}}{A}$$

$$= \frac{90 \cdot 10^6 \cdot 92,5}{55,13 \cdot 10^6} - \frac{36 \cdot 10^3}{7530}$$

$$= 150,99 - 4,8 = 146,2 \text{ N/mm}^2$$

80 % laipan nimellisestä vetolujuudesta on:

$$\sigma_z = 0,80 \cdot f_y / \gamma_{M0} = 0,80 \cdot 235 / 1,1 = 170,91 \text{ N/mm}^2$$

Käytetään a-mitan laskelmassa yo.  $\sigma_z$  -arvoa, jolloin ehdosta 1) saadaan ( $\tau_{yz}=0$ ) a-mitaksi:

$$a_f \geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t}{2 \cdot f_u} \sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} = \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t \cdot \sigma_z}{\sqrt{2} \cdot f_u}$$

$$= \frac{0,8 \cdot 1,25 \cdot 15 \cdot 170,91}{\sqrt{2} \cdot 360} = 5,04 \text{ mm}$$

**Valitaan:** a-mitta on = 6 mm.



**Uuman hitsit** (staattisesti epämääräinen tapaus).

Materiaalitiedot:

Teräs: S235J2, jonka myötöraja on

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$  ja vetomurtolujuus on

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$  (nimellinen)

$\beta_w = 0,8$

Staattisesti epämääräisissä tapauksissa voidaan esimerkin 2 tekstin mukaisesti läheteä levyissä vaikuttavista jännityksistä.

Mitoitusehdosta 1 saadaan todellisilla jännityksillä ratkaistuksi a-mitalle vähimmäisarvo (oletetaan että säde  $r = \text{noin } a\sqrt{2}$ ). Sen lisäksi tulee ottaa huomioon muut hitsin lujuudelle asetetut ehdot:

Lasketaan suurimmat jännityskomponenttien  $\sigma_z$  ja  $\tau_{yz}$  todelliset arvot uuman yläpäässä [2 hitsiä, etäisyys

$$e = (H - 2 t_f - 2\sqrt{2} r) / 2 = 77 \text{ mm},$$

uuman korkeus  $l_w = 2e$ . Oletetaan lisäksi, että leikkausvoima siirtyy kokonaan uuman hitsien kautta]. Taivutuksen ja vedon aiheuttama jännitys on:

$$\sigma_w = \frac{M_{sd} \cdot e}{I_x} - \frac{N_{sd}}{A} = 120,915 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{yz} = \frac{V_{sd}}{t_w \cdot l_w} = \frac{75000}{9 \cdot 154} = 54,11 \text{ N/mm}^2$$

**VERTAILU: Uuman hitsit** (kun staattisesti määrätty tapaus = hitsiin vaikuttaa pelkkä leikkausvoima):

Kun liitoksessa vaikuttaa pelkkä leikkausvoima, vain ehto 1 tarvitaan. Saadaan:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{3 \cdot \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3} \cdot \tau_{\parallel} \\ &= \sqrt{3} \cdot \frac{V_{sd}}{2 \cdot a \cdot l} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\sigma_w}{2\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot 120,915 \\ &= 42,75 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Mitoitusehto:

$$\begin{aligned} a &\geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t_w}{2 \cdot f_u} \sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} \\ &= \frac{0,8 \cdot 1,25 \cdot 9}{2 \cdot 360} \cdot 111,53 \text{ N/mm}^2 = 1,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kun lähtökohdaksi otetaan ehto uumalevyn hitsien muodonmuutoskyvystä, tulee  $\sigma_z$ -arvona käyttää 80 % uumalevyn vetovoimakestävyydestä, jolloin  $\sigma_z$  saa arvon  $\sigma_z = 0,8 \cdot f_y / 1,1 = 0,8 \cdot 235 / 1,1 = 170,91 \text{ N/mm}^2$ . Tällöin hitsien a-mitaksi saadaan:

$$\begin{aligned} \sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} &= \sqrt{2 \cdot 170,91^2 + 3 \cdot 54,11^2} \\ &= 259,236 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saadaan: } a &\geq \frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot t_w}{2 \cdot f_u} \sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} \\ &= \frac{0,8 \cdot 1,25 \cdot 9}{2 \cdot 360} \cdot 259,236 = 3,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

Uuman hitsien a-mitaksi pitää valita 4 mm.

Jos levyssä ei ole vetovoimaa (leikkausliitokset), saadaan a-mitalle arvoksi suurimmasta leikkausvoimasta  $V_{sd} = 75 \text{ kN}$ :

$$a \geq \frac{\sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 1,25 \cdot 75000}{2 \cdot 170 \cdot 360} = 1,06 \text{ mm}$$

Esimerkissä hitsiin vaikuttaa kuitenkin myös vetovoima, joka on suurimmillaan uuman ja laipan liittymässä (ks. laskelma oikealla puolella).

### Esim. 3 - KESTÄVYYDET YKSINKERTAISTETUN MENETELMÄN MUKAAN

Pienahitsien kestävyys voidaan todeta riittäväksi yksinkertaistetulla menetelmällä, jos hitsin pituudella voimien resultantti yksikköpituutta kohden toteuttaa seuraavan yhtälön:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad , \quad F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad , \quad \text{missä } f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}}$$

missä

$F_{w,Ed}$  on hitsissä vaikuttavien voimien resultantin mitoitusarvo yksikköpituutta kohden, ja

$F_{w,Rd}$  on hitsin kestävyuden mitoitusarvo yksikköpituutta kohden.

$f_{vw,d}$  on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo ja  $a$  on pienahitsin  $a$ -mitta. Vakiot  $\beta_m$  ja  $\gamma_{M2}$  on määritelty kuten edellä.

Hitsin kestävyuden mitoitusarvo yksikköpituutta kohden  $F_{w,Rd}$  lasketaan eo. kaavalla riippumatta hitsin määrävän tason suunnasta verrattuna kuormitusten resultantiin. Pilarin uuman hitseissä kuormitusresultantin suuruus muuttuu hitsin pituudella ja on suurimmillaan uuman ja vedetyn laipan liitoksessa.

Hitsien kestävyuden mitoitusarvo yksikköpituutta kohden saadaan:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_m \cdot \gamma_{M2}} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0,8 \cdot 1,25}$$

$$= 207,85 \text{ N/mm}^2 \quad ,$$

jolloin eri  $a$  - mitoilla saadaan :

$$a = 4 \text{ mm}, \quad F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 207,85 \cdot 4 = 831,4 \text{ N/mm}$$

$$a = 5 \text{ mm}, \quad F_{w,Rd} = 1039,2 \text{ N/mm}$$

$$a = 6 \text{ mm}, \quad F_{w,Rd} = 1247,1 \text{ N/mm}$$

$$\text{Vertailu: } F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$$

**Pilarin laipan** suurimman vetovoiman kuormitus hitsin pituusyksikköä kohden lasketaan suurimman taivutusmomentin ja oman painon avulla:

$$F_{Ed} = M_{Sd} / h_f - N_{Sd,min} / 2 =$$

$$90 / 0,185 - 54 / 2 = 468,49 \text{ kN}$$

Saadaan:

$$F_{w,Ed} = F_{Ed} / (2 \cdot L_f - t_w) = 1198,2 \text{ N/mm}$$

missä  $h_f$  on laippojen keskipisteiden välinen etäisyys, 185 mm,  $L_f$  on laippojen leveys, 200 mm, ja  $t_w$  on uuman paksuus 9 mm.

Vertaamalla viereiseen kestävyystaulukkoon saadaan epäyhtälöstä:

Laipan hitsin  $a$ -mitaksi pitää valita  $a = 6$  mm. (vrt. tarkempi analyysi, 6 mm)

**Uuman hitsien** kuormitus per pituusyksikkö voidaan laskea taivutusmomentin, aksiaalivoiman ja leikkausvoiman jännityksistä uuman ja laipan liitoksen kohdalla. Jännitysten laskelmat tehdään osin samoin kuin tarkemmassa menetelmässä. Kuormitusresultantti per pituusyksikkö saadaan kertomalla resultanttijännitys uuman paksuudella (9 mm), ja jakamalla tulos kahtia (kaksi hitsiä). Eo. kohdan mukaisesti (kun otetaan huomioon hitsin muodonmuutoskykyvaatimus) saadaan:

$$\sqrt{2\sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2} \cdot t_w / 2 = 111,53 \cdot 9 / 2 = 501,9 \text{ N/mm}^2$$

Vertailusta saadaan: uuman hitsien  $a$ -mitaksi pitää valita  $a = 4$  mm.

Oheinen esimerkki osoittaa, että staattisesti epämääräisissä liitoksissa, joissa hitseissä saattaa olla lineaarisesti muuttuva jännitystila, yksinkertaistettu menetelmä johtaa suunnilleen samaan työmäärään kuin perusmitoitusmenetelmä.