KÄSIKIRJA - RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN KÄYTTÖ KANTAVISSA RAKENTEISSA

NELJÄS PAINOS

SCI Steel Knowledge

Teräsrakenneyhdistys
Finnish Constructional Steelwork Association

Lisätietoja

Teräsrakenneyhdistys ry, TRY ry
Unioninkatu 14
00130 Helsinki
Email: pekka.yrjola@terasrakenneyhdistys.fi
www.terasrakenneyhdistys.fi

© 2017 SCI. All rights reserved. www.steel-sci.com

ISBN 952-9683-37-5

Julkaisija Teräsrakenneyhdistys ry

The Steel Construction Insitute (SCI) on tehnyt kaiken mahdollisen, jotta tässä esitetyt tiedot ovat teknisesti oikeita. Lukijalle todetaan kuitenkin, että tässä esitetty aineisto on tarkoitettu vain yleiseksi informaatioksi. The Steel Construction Institute ja muut mukana olleet sanoutuvat erityisesti irti kaikista tuottamusvastuista tai menetyksistä, vaurioista ja vammoista, jotka aiheutuvat tässä julkaisussa esitettyjen tietojen käytöstä

Saatavana seuraavat kieliversiot:

Englanti ISBN 978-85942-226-7
Ranska ISBN 978-185942-227-4
Saksa ISBN 978-185942-228-1
Italia ISBN 978-185942-229-8
Puola ISBN 978-185942-2304
Suomi ISBN 978-185942-2311
Portugali ISBN 978-185942-232-8
Espanja ISBN 978-185942-233-5
Ruotsi ISBN 978-185942-234-2
Tsekki ISBN 978-185942-235-9

Kansikuvat:

Vasen yläreuna:
Katos, Napp Pharmaceutical, Cambridge, UK
Austeniittinen teräslaji 1.4401, Lähde: m-tec

Oikea yläreuna:
Offshore uudelleenkaasuunnutuslaitoksen jalustarakenne,
Austeniittinen teräslaji 1.4301, Lähde: Montanstahl

Vasen alareuna:
Maitotila, Cornell University, College of Agriculture and Life Sciences,
Austeniittinen teräslaji 1.4301/7, Lähde: Stainless Structurals

Oikea alareuna:
Kevyen liikenteen silta, Águila, Espanja
Austeniittinen teräslaji 1.4462, Lähde: Acuamed

Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa

(Neljäs painos käsikirjasta: Design Manual for Structural Stainless Steel)

31 maaliskuuta 2017

JOHDANTO

Neljäs painos

Käsikirjan neljännen painoksen on valmistellut Nancy Baddoo, The Steel Construction Institute, osana eurooppalaista RFCS hanketta *Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels* (PUREST) (sopimus 709600).

Tämä neljäs painos on yksityiskohdiltaan kolmannen painoksen täydellinen uudistaminen; suurimmat muutokset ovat seuraavat:

- Yhtenäistäminen standardin EN 1993-1-4 muutoksen A1:2015 mukaiseksi,
- Ferriittisten ruostumattomien terästen sisällyttäminen, perustuen tutkimusaineistoon hankkeessa “the Structural applications of ferritic stainless steels (SAFSS)” (RFSR-CT-2010-00026),
- Uuden tutkimustietouden lisääminen liittyen ruostumattomien terästen termisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin palossa,
- Suunnitteluohjeiden ja viittauksien (standardeihin EN 10088, EN 1993 ja EN 1090) päivittäminen,
- Liitteen ”Materiaalikäyttäytymisen mallintaminen” lisääminen,
- Liitteen ”kylmämuovaamalla valmistettujen profiilien lujittuminen” - laskentamenettely lisääminen,
- Myötölujittumisen hyödyntävän mitoitusmenetelmän ”jatkuvan lujittumisen menetelmä” lisääminen.

PUREST projektiin osallistuneet tahot olivat:

The Steel Construction Institute (SCI)
(co-ordinator)
Silwood Park, Ascot, SL5 7QN, United Kingdom,
www.steel-sci.com

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Calle Jordi Girona 31, Barcelona 08034
Spain
www.upc.edu

Universität Duisburg-Essen (UDE)
Universitätsstraße 2, Essen 45141, Germany
www.uni-due.de

Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven)
Oude Markt 13, Leuven 3000, Belgium
www.kuleuven.be

RINA Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A (CSM)
Via Di Castel Romano 100, Rome 00128, Italy
www.rinaconsulting.org/en/csm

Stalbyggnadinstitutet (SBI)
Kungsträdgårdsgatan 10, 111 47 Stockholm, Sweden
www.sbi.se

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza (PRz)
al. Powstancow Warszawy 12, Rzeszów, 35 959, Poland
www.prz.edu.pl

Imperial College of Science Technology and Medicine
South Kensington Campus Exhibition Road, London, SW7 2AZ, United Kingdom
www.imperial.ac.uk

Teräsrakenneyhdistys ry
Unioninkatu 14 3 krs, Helsinki 00130, Finland
www.terasrakenneyhdistys.fi

České vysoké učení technické v Praze (CVUT)
Zikova 4, Praha 16636, Czech Republic
www.cvut.cz

Universidade de Coimbra
Paço das Escolas, Coimbra, 3001 451, Portugal
www.uc.pt

OneSource Consultoria Informática
Urbanizaçao Ferreira Jorge - 1° dto Lote 14, Coimbra 3040 016 , Portugal
www.onesource.pt

Seuraavat henkilöt ovat vaikuttaneet tämän käsikirjan neljännen painoksen valmisteluun:

- Sheida Afshan (Brunel University London, UK)
- Itsaso Arrayago (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)
- Leroy Gardner (Imperial College London, UK)
- Graham Gedge (Arup, UK)
- Michal Jandera (Czech Technical University of Prague, Czech Republic)
- Esther Real (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)
- Barbara Rossi (KU Leuven, Belgium)
- Natalie Stranghöner (Universität Duisberg-Essen, Germany)
- Ou Zhao (Nanyang Technological University, Singapore)

Kolmannen painoksen esipuhe

Tämän käsikirjan kolmas painos on syntynyt RFCS-projektin *Valorisation Project - Structural design of cold worked austenitic stainless steel* (sopimus RFS2-CT-2005-00036) tuloksena. Projektin koordinaattorina on toiminut Steel Construction Institute (SCI). Tässä kolmannessa painoksessa päivitetään toinen painos kokonaan ja soveltamisalaa laajennetaan kylmämuokattuihin ruostumattomiin teräksiin sekä päivitetään viittaukset Eurocodeihin. Tässä kolmannessa painoksessa viitataan standardien EN 1990, EN 1991 ja EN 1993 kyseeseen tuleviin osiin. Luvun 7 rakenteellista palomitoitusta koskeva osa on päivitetty ja ruostumattomien terästen säilyvyyttä erilaisissa maaperissä ja elinkaarikustannuksia koskevat kohdat on lisätty. Kolme uutta esimerkkiä on lisätty ja ne koskevat kylmämuokattujen ruostumattomien terästen käyttöä. Tämän käsikirja-projektin johtoryhmä on koostunut projektin sopijaosapuolista ja rahoittajista, ja johtoryhmä on valvonut työtä ja vaikuttanut käsikirjan sisältöön. Seuraavat organisaatiot ovat osallistuneet tämän kolmannen painoksen kirjoittamiseen:

- The Steel Construction Institute (SCI) (Project co-ordinator)
- Centro Sviluppo Materiali (CSM)
- CUST, Blaise Pascal University
- Euro Inox
- RWTH Aachen, Institute of Steel Construction
- VTT Technical Research Centre of Finland
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Toisen painoksen esipuhe

Tämä käsikirja on syntynyt ECSC:n rahoittaman projektin *Valorisation Project - Development of the use of stainless steel in construction* (sopimus 7215-PP-056) tuloksena. Projektin koordinaattorina on toiminut Steel Construction Institute (SCI). Tässä käsikirjassa päivitetään Euro Inox:n v. 1994 julkaisema ja SCI:n vuosina 1989 - 1992 laatima käsikirja *Design manual for structural stainless steel*.

Tässä uudessa käsikirjassa on otettu huomioon noin kymmenen viime vuoden aikana tuotettu uusi tieto koskien ruostumattomasta teräksestä tehtyjen rakenteiden käyttäytymistä. Erityisesti on otettu huomioon ECSC:n rahoittamassa projektissa, *Development of the use of stainless steel in construction* (sopimus 7210-SA/842) laaditut uudet suositukset, joiden perusteella käsikirjan soveltamisalaa on myös laajennettu koskemaan pyöreitä rakenneputkia ja paloteknistä mitoitusta. Viimeisten kymmenen vuoden aikana on laadittu lukuisia euroop-palaisia standardeja, jotka koskevat mm. materiaaleja, kiinnittimiä, valmistusta, asennusta, hitsausta, jne. Tämä käsikirja on päivitetty myös standardien ja niihin viittaamisen osalta.

RAHOITTAJAT

Seuraavat tahot ovat rahoittaneet Käsikirjan tämän version ja suuret kiitokset heidän tuestaan:

- The European Union's Research Fund for Coal and Steel,
- Outokumpu,
- Aperam,
- Industeel,
- AcerInox,
- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM),
- Nickel Institute,
- Stalatube.

ESIPUHE

Käsikirja on laadittu ohjeeksi kokeneille teräsrakennesuunnittelijoille, joilla ei välttämättä ole kokemusta ruostumattomien terästen käytöstä. Käsikirjalla ei ole erityistä laillista statusta eikä se vapauta suunnittelijaa vastuusta.

Käsikirja jakaantuu kahteen osaan:

- Osa I - Suositukset
- Osa II - Mitoitusesimerkit.

Osan I suositukset on kirjoitettu rajatilamuotoon ja mahdollisuuksien mukaan suositukset ovat yhteneväiset seuraavien Eurocode 3 *Design of steel structures (Teräsrakenteiden suunnittelu)* osien kanssa:

EN 1993-1-1 *Design of steel structures: General rules and rules for buildings (SFS-EN 1993-1-1: Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt)*

EN 1993-1-2 *Design of steel structures: Structural fire design (SFS-EN 1993-1-2: Teräsrakenteiden suunnittelu. Palonkestävyys)*

EN 1993-1-3 *Design of steel structures: General rules: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting (SFS-EN 1993-1-3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt. Lisäsääntöjä kylmämuovaamalla valmistetuille sauvoille ja levyille)*

EN 1993-1-4 *Design of steel structures: General rules: Supplementary rules for stainless steels (SFS-EN 1993-1-4: Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt)*

EN 1993-1-5 *Design of steel structures: Plated structural elements (SFS-EN 1993-1-5: Teräsrakenteiden suunnittelu. Levyrakenteet)*

EN 1993-1-8 *Design of steel structures: Design of joints (SFS-EN 1993-1-8. Teräsrakenteiden suunnittelu. Liitosten suunnittelu)*

EN 1993-1-9 *Design of steel structures: Fatigue (SFS-EN 1993-1-9. Teräsrakenteiden suunnittelu. Väsyminen)*

EN 1993-1-10 *Design of steel structures: Material toughness and through-thickness properties (SFS-EN 1993-1-0. Teräsrakenteiden suunnittelu. Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet)*

Eurocode 3 on parhaillaan revisioitavana ja sen jokainen osa, mukaanlukien EN 1993-1-4, julkaistaan arviolta vuonna 2023. Tässä käsikirjassa esitetään muutoksia mitoituskaavoihin, joiden oletetaan sisältyvän standardiin EN 1993-1-4 käynnissä olevassa revisiossa Harmaalla pohjalla olevissa laatikoissa selvennetään eroja uusien mitoitusehtojen ja nyt voimassa olevassa standardissa EN 1993-1-4:2015 olevien suunnitteluehtojen välillä.

Tässä käsikirjassa esitetään suosituksia tietyille kertoimille. Näitä arvoja voidaan muuttaa kansallisissa liitteissä (NA, National Annex).

Osan II mitoitusesimerkeissä havainnollistetaan ohjeiden käyttöä. Mitoitusesimerkkien yhteydessä viitataan tämän käsikirjan eri kohtiin, ellei toisin mainita.

Suositukset ja mitoitusesimerkit ovat ladattavissa sähköisessä muodossa sivustolta www.steel-stainless.org/designmanual ja sivustolta Steelbiz, SCI:n tekninen informaatiojärjestelmä (www.steelbiz.org). Käsikirjan kommenttiosa, joka sisältää kirjallisuusviitteitä, on myös ladattavissa em. kotisivuilta. Kommenttiosan tarkoitus on, että suunnittelija voi arvioida suositusten perusteet ja että helpotetaan käsikirjan uudistamista, kun uutta tietoa tuotetaan. Kommenttiosassa esitetään erilaisten kokeiden tuloksia, jotka muodostavat tämän käsikirjan tausta-aineiston.

Sivustolta www.steel-stainless.org/designmanual on ladattavissa online mitoitusohjelma sekä apps mobiililaitteille, jotka laskevat poikkileikkaussuureet sekä sauvan kestävyyden vakiopoikkileikkauksille ja käyttäjän määrittämille poikkileikkauksille tämän käsikirjan suositusten mukaisesti.

Tässä käsikirjassa esitetyt ohjeet perustuvat kirjoittamishetkellä parhaaseen olemassa olevaan tietoon. Käsikirjan tekijät tai muut projektin osapuolet eivät ota mitään vastuuta ohjeiden käytöstä aiheutuvista mahdollisista henkilövahingoista, kuolemista, muista menetyksistä, vaurioista tai aikatauluviiveistä.

Sisältö

		Sivu Nro.
OSA 1 - SUOSITUKSET		1
1	JOHDANTO	2
1.1	Mitä on ruostumaton teräs?	2
1.2	Rakenteisiin ja rakennekäyttöön sopivat ruostumattomat teräkset	4
1.3	Ruostumattoman teräksen käyttökohteet rakennusteollisuudessa	6
1.4	Soveltamisala	7
1.5	Merkinnät	7
1.6	Sauvojen akselit	9
1.7	Yksiköt	9
2	RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN OMINAISUUDET	11
2.1	Jännitys-venymäkäyttäytyminen	11
2.2	Jännitys-venymäkäyttäytymiseen vaikuttavat tekijät	13
2.3	Sovellettavat standardit ja suunnittelulujuudet	14
2.4	Fysikaaliset ominaisuudet	23
2.5	Lämpötilan vaikutukset	25
2.6	Sinkitys ja kontakti sulaan sinkkiin	25
2.7	Eri tuotemuotojen saatavuus	25
2.8	Elinkaarikustannukset ja ympäristövaikutukset	28
3	Pitkäaikaiskestävyys ja materiaalin valinta	29
3.1	Yleistä	29
3.2	Korroosiomuodot ja eri teräslajien käyttäytyminen	30
3.3	Korroosio eri ympäristöissä	33
3.4	Korroosioneston suunnittelu	35
3.5	Materiaalin valinta	38
4	SUUNNITTELUPERUSTEET	46
4.1	Yleiset vaatimukset	46
4.2	Rajatilamitoitus	46
4.3	Kuormitukset	47
5	POIKKILEIKKAUSTEN OMINAISUUDET	48
5.1	Yleistä	48
5.2	Suurimmat sallitus leveys-paksuussuhteet	48
5.3	Poikkileikkausluokitus	48
5.4	Teholliset leveydet	52
5.5	Jäykistetyt taso-osat	58
5.6	Poikkileikkausominaisuuksien laskenta	61
5.7	Poikkileikkauskestävyydet	64
6	SAUVOJEN MITOITUS	69
6.1	Yleistä	69
6.2	Vedetyt sauvat	69
6.3	Puristetut sauvat	69
6.4	Taivutetut sauvat	74
6.5	Sauvat, joihin kohdistuu samanaikaisia aksiaalisia kuormia ja taivutusmomentteja	86
7	KIINNITYSTEN JA LIITOSTEN SUUNNITTELU	89
7.1	Yleiset ohjeet	89
7.2	Ruuvikiinnitykset	91
7.3	Mekaaniset kiinnittimet ohuille materiaaleille	96

7.4 Hitsauskiinnitykset 96

8 PALOMITOITUS 101
8.1 Yleistä 101
8.2 Mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa 101
8.3 Rakenteellisen palonkestävyyden määrittäminen 104
8.4 Termiset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa 111
8.5 Materiaalimallit korkeissa lämpötiloissa 114

9 VÄSYMINEN 116

10 KOKEELLINEN MITOITUS 117
10.1 Yleistä 117
10.2 Jännitys-venymäkuvaajan määrittäminen 117
10.3 Rakenneosien koestus 117

11 VALMISTUS 119
11.1 Yleistä 119
11.2 EN 1090 (osat) Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus 119
11.3 Toteutusluokka 120
11.4 Varastointi ja käsittely 121
11.5 Muotojen valmistaminen 122
11.6 Hitsaus 124
11.7 Kitkasyöpyminen ja kiinnileikkautuminen 129
11.8 Pinnan viimeistely 130

LIITE A Ruostumattomien terästen merkintöjen vastaavuus 131

LIITE B Kylmämuovaamalla valmistettujen profiilien lujittuminen 132

LIITE C Materiaalikäyttäytymisen mallintaminen 135

LIITE D Jatkuvan lujittumisen menetelmä 138

LIITE E Kriittinen kiepahdusmomentti kimmoteorian mukaan 144

OSA II – MITOITUS ESIMERKIT 147

OSA 1 - SUOSITUKSET

1 JOHDANTO

1.1 Mitä on ruostumaton teräs?

Ruostumattomiksi teräksiksi nimitetään joukkoa korroosionkestäviä ja tulenkestäviä sekä vähintään 10,5 % kromia sisältäviä teräksiä. Erilaisten lujuus-, hitsattavuus- ja sitkeysvaatimuksiltaan eroavien rakenne- ja koneterästen tapaan myös ruostumattomien terästen välillä on eroja korroosionkestävyydessä ja lujuudessa. Ruostumattoman teräksen ominaisuudet perustuvat kontrolloituun seostamiseen, jolloin jokainen seosaine vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin ja kykyyn kestää erilaisia korroosiota aiheuttavia ympäristöolosuhteita. On tärkeää valita sellainen ruostumaton teräs, joka on soveltuva käyttökohteeseen ja joka ei ole turhaan yliseostettu ja kallis.

Ruostumattoman teräksen yli 10,5 %:n kromipitoisuus, teräksen puhdas pinta sekä altistuminen ilman tai muun hapettavan ympäristön vaikutukselle muodostavat spontaanisti teräksen pinnalle läpinäkyvän ja tiukasti kiinnittyneen kromipitoisen kerroksen. Mikäli tämä oksidikerros vaurioituu esimerkiksi naarmuttamisen tai leikkaamisen seurauksena, se uusiutuu itsestään reagoimalla hapen kanssa. Vaikkakin oksidikerros on hyvin ohut (5×10^{-6} mm), se on stabiili ja tiivis. Niin kauan, kun oksidikerros säilyy ehjänä teräksen pinnalla, ruostumaton teräs on korroosiota kestävä eikä myöhemminkään reagoi ympäristön kanssa. Tästä syystä korroosiolta suojaavaa oksidikerrosta nimitetään passiivikerrokseksi. Passiivikerroksen stabiiliuteen vaikuttavat teräksen koostumus, teräksen pinnan käsittely ja käyttöympäristön syövyttävyys. Stabiilius paranee kromipitoisuuden kasvaessa ja edelleen molybdeeni- ja typpiseostuksella.

Ruostumattomat teräkset voidaan luokitella seuraaviin viiteen terästyyppiin, joilla jokaisella terästyypillä on tyypilliset ominaisuutensa ja terästyyppi sisältää laajan valikoiman korroosionkestävyydeltään erilaisia teräslajeja.

Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Yleisimmin käytössä olevat ruostumattomat teräkset sisältävät 17-18 % kromia ja 8-11 % nikkeliä. Näitä kutsutaan austeniittisiksi ruostumattomiksi teräksiksi. Tyypillisimmillä rakenneteräksillä on kuutiokeskinen atomihila, austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä puolestaan pintakeskinen atomihila. Tästä johtuen austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat paitsi korroosionkestäviä, myös hyvin sitkeitä sekä helposti kylmämuovattavia ja hitsattavia. Hiiliteräksiin verrattuna, niillä on parempi iskusitkeys laajalla lämpötila-alueella. Austeniittisia ruostumattomia teräksiä voidaan lujittaa kylmämuokkaamalla, mutta ei lämpökäsittelyillä. Niiden korroosionkestävyyttä voidaan parantaa seostamalla enemmän kromia ja lisäämällä seosaineiksi molybdeeniä tai typpeä. Austeniittiset ruostumattomat teräkset 1.4301/1.4307 ja 1.4404 ovat ylivoimaisesti yleisimpiä rakenteissa käytettyjä ruostumattomia teräksiä.

Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Suosituimpien ferriittisten ruostumattomien terästen kromipitoisuus on 10,5-18 %. Ferriittiset ruostumattomat teräkset sisältävät korkeintaan pieniä määriä tai eivät lainkaan nikkeliä ja niillä on rakenneterästen tapaan kuutiokeskinen atomihila. Ferriittisten ruostumattomien terästen hinta on alhaisempi ja hinnan vaihtelu

vakaampaa kuin vastaavan korroosionkestävyystason austeniittisten ruostumattomien terästen. Austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna niiden sitkeys on huonompi ja ne ovat hankalammin hitsattavissa. Niiden muovattavuus- ja koneistettavuusominaisuudet ovat samat kuin rakenneteräksen S355. Myös ferriittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan lujittaa kylmämuokkaamalla, joskin austeniittisia ruostumattomia teräksiä rajoitetummin. Kuten austeniittisia ruostumattomia teräksiä, ei ferriittisiäkään voida lujittaa lämpökäsittelyillä. Ne kestävät jännityskorroosiota hyvin ja niiden korroosionkestävyyttä voidaan parantaa suuremmalla kromiseostuksella sekä lisäämällä seosaineeksi molybdeeni. Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään tyypillisesti sisätiloissa mutta myös ulkotiloissa syövyttävyydeltään vähäisissä ilmasto-olosuhteissa. Ne tarjoavat korroosionkestävän vaihtoehdon useisiin sinkittyjen ohutlevyterästen käyttösovelluksiin. Ferriittisiä teräksiä on saatavilla tyypillisesti paksuusalueella 4 mm: iin asti

Duplex (austeniittis-ferriittinen) ruostumaton teräs

Ruostumattomien duplex-terästen mikrorakenne koostuu austeniitista ja ferriitistä, ja siksi niitä kutsutaan myös austeniittis-ferriittisiksi ruostumattomiksi teräksiksi. Tyypillisesti ne sisältävät 20-26 % kromia, 1-8 % nikkeliä, 0,05-5 % molybdeeniä ja 0,05-0,3 % typpeä. Seostuksesta riippuen ruostumattomien duplex-terästen hinta saattaa olla vakaampaa kuin austeniittisten ruostumattomien terästen. Ruostumattomat duplex-teräkset ovat noin kaksi kertaa hehkutetun tilan austeniittisia ruostumattomia teräksiä lujempia, mikä mahdollistaa ohuempien ja siten kevyempien rakenteiden käytön esimerkiksi siltarakenteissa tai offshore-öljynporauslauttojen merenpinnan yläpuolisissa rakenteissa. Duplex ruostumattomat teräkset soveltuvat moniin syövyttäviin käyttöympäristöihin. Ruostumattomat duplex-teräkset ovat sitkeitä mutta austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna lujuudestaan johtuen vaikeammin muokattavissa. Ne eivät ole alttiita jännityskorroosiolle. Niitä voidaan lujittaa kylmämuokkaamalla mutta ei lämpökäsittelyillä. Duplex ruostumattomien terästen hitsaamisessa tulee erityisesti noudattaa lämmöntuontisuosituksia. Koska käyttöön valittava ruostumaton duplex-teräs on usein ferriittistä ruostumatonta terästä seinämänvahvuudeltaan paksumpaa, voidaan näiden ruostumattomien teräsryhmien nähdä täydentävän toisiaan.

Martensiittiset ruostumattomat teräkset

Martensiittisilla ruostumattomilla teräksillä on ferriittisten ruostumattomien terästen ja rakennehiiliterästen tapaan kuutiokeskinen atomihila, ja korkeasta hiilipitoisuudesta johtuen niitä voidaan lujittaa lämpökäsittelyllä. Martensiittisia ruostumattomia teräksiä käytetään yleensä nuorrutettuina, minkä ansiosta materiaalilla on korkea lujuus ja kohtalainen korroosionkestävyys. Niitä käytetään ympäristöissä, joissa hyödynnetään teräksen kulumis- ja hankauskestävyyttä ja kovuutta, kuten muun muassa ruokailuvälineet, kirurgiset työkalut, veitset, kulutuslevyt sekä turbiinisiivet. Niiden sitkeys on huonompi ja ne ovat lovivaikutukselle herkempiä kuin ferriittiset tai austeniittiset ruostumattomat teräkset ja ruostumattomat duplex-teräkset. Vaikka useimpia martensiittisia ruostumattomia teräksiä voidaan hitsata, saattaa tämä vaatia materiaalin esilämmitystä tai hitsin lämpökäsittelyä ja siten saattaa rajoittaa teräksen käyttöä hitsattavissa komponenteissa.

Erkautuslujitetut ruostumattomat teräkset

Erkautuslujitettuja teräksiä voidaan eritellä martensiittisiin, semi-austeniittisiin ja austeniittisiin teräksiin mikrorakenteen perusteella. Lämpökäsittelyn avulla niiden lujuutta voidaan korottaa merkittävästi. Erkautuslujitettuja ruostumattomia teräksiä käytetään tyypillisesti ilmailu- ja avaruusteollisuudessa, vetotangoissa, akseleissa, ruuveissa sekä muissa korkeaa lujuutta ja kohtalaista korroosionkestävyyttä

vaativissa käyttökohteissa Normaalisti näitä teräksiä ei käytetä hitsaamalla tapahtuvassa valmistuksessa. Erkautuslujitettujen ruostumattomien terästen korroosionkestävyys on yleisesti ottaen korkeampi kuin martensiittisilla ruostumattomilla teräksillä, ja vastaa kromipitoisuudeltaan 18% ja nikkelipitoisuudeltaan 8% austeniittisen ruostumattoman teräksen korroosionkestävyyttä.

Ohjeita ruostumattoman teräksen valintaan on esitelty luvussa 3.5.

1.2 Rakenteisiin ja rakennekäyttöön sopivat ruostumattomat teräkset

Tämä käsikirja käsittelee rakenteellisissa käyttöympäristöissä yleisimmin käytettyjä austeniittisia, duplex ja ferriittisiä ruostumattomia teräksiä. Rakenteissa käytettävien terästen kemiallista koostumusta on käsitelty taulukossa 2.1 ja lujuutta taulukossa 2.2.

Standardi EN 1993-1-4 luettelee laajan joukon austeniittisia teräslajeja mutta vähemmän ferriittisiä teräslajeja kuin tähän käsikirjaan on sisällytetty. Oletettavaa on, että standardin EN 1993-1-4 sisältämiä ferriittisiä teräksiä laajennetaan revision yhteydessä kattamaan tässä käsikirjassa esitellyt ferriittiset teräkset.

Tämän käsikirjan suunnitteluohjeet ovat sovellettavissa standardissa EN 10088 (osat) esiteltyihin muihin austeniittisiin, duplex ja ferriittisiin ruostumattomiin teräksiin, (huomioi kuitenkin kohta 4.2). Teräksen pitkäaikaiskestävyyttä, työstämistä ja hitsaamista koskevissa kysymyksissä on syytä ottaa yhteyttä ruostumattoman teräksen valmistajaan tai asiantuntijaan.

Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittisia ruostumattomia teräksiä valitaan tyypillisesti rakenteellisiin käyttökohteisiin, joissa materiaaleilta edellytetään lujuutta, hyvää korroosionkestävyyttä, muokattavuutta (materiaalin soveltuvuutta taivuttamiselle pienelle taivutussäteelle), hitsattavuutta työmaalla ja konepajassa sekä seismisissä käyttökohteissa erittäin suurta venymää ennen murtumista.

Teräslajit 1.4301 (tunnetaan myös 304) ja 1.4307 (tunnetaan myös 304L) ovat useimmin käytettyjä austeniittisia ruostumattomia teräksiä, joiden koostumuksesta 17,5-20 % on kromia ja 8-11 % nikkeliä. Ne sopivat haja-asutusalue- ja kaupunkikäyttöön sekä vähäisen korroosiorasituksen teollisuusympäristöihin.

Teräslajien 1.4401 (lähes vastaava kuin 316) ja 1.4404 (lähes vastaava kuin 316L) koostumuksesta noin 16-18 % on kromia, 10-14 % nikkeliä sekä 2-3 % molybdeeniä, joka parantaa korroosionkestävyyttä. Nämä teräslajit soveltuvat hyvin meri- ja teollisuusympäristöihin.

Huomautus: Hitsattaviin osiin on syytä määrittää vähähiilinen austeniittinen ruostumaton teräslaji. Matala hiilipitoisuus tarkoittaa alentunutta riskiä herkistymiselle (kromikarbidien erkautumiselle) ja raerajakorroosiolle hitsin lämmölle altistuneilla alueilla. Tällaisia teräslajeja ovat esimerkiksi 1.4307 ja 1.4404 tai teräslajien 1.4541 ja 1.4571 kaltaiset stabiloidut teräslajit. Alhainen hiilipitoisuus ei vaikuta korroosionkestävyyteen hitsaamattomilla alueilla. Amerikkalaisessa nimikejärjestelmässä teräslajin yhteydessä merkintä '*L*' merkitsee vähähiilistä lajia. Nykyaikaisilla teräksen tuotantomenetelmillä kaupalliseen käyttöön tuotettu teräs on usein vähähiilistä ja voidaan merkitä "kaksoislajiksi" (esimerkiksi 1.4301/1.4307,

joka vastaa lujuudeltaan teräslajia 1.4301 ja hiilipitoisuudeltaan teräslajia 1.4307). Kehittymättömämpää tuotantoteknologiaa käytettäessä näin ei voida olettaa, ja siksi matala hiilipitoisuus vaaditaan erikseen kokoonpanoeritelmässä etenkin, jos projekti vaatii hitsausta.

Teräslaji 1.4318 on matalan hiilipitoisuuden ja korkean typpipitoisuuden ruostumaton teräs, joka lujittuu voimakkaasti kylmämuovauksen yhteydessä. Hehkutetussa tilassa 1.4318 materiaalin mitoituslujuus on 350 N/mm^2. Sitä on käytetty pitkään hyvällä menestyksellä junavaunujen rakenteissa ja se soveltuu myös auto- ja ilmailuteollisuuden tuotteisiin sekä arkkitehtonisiin sovelluksiin. Teräslajin 1.4318 korroosionkestävyys vastaa terälajin 1.4301 korroosiokestävyyttä ja se soveltuu parhaiten sovellutuksiin, joissa määrät ovat suuria ja joissa vaaditaan suurempaa lujuutta kuin teräslajilla 1.4301. Teräslaji 1.4318 hankitaan suoraan tehtaalta ja siksi tätä teräslajia hankkivien tulee tiedustella saatavuutta toimittajalta. Teräslaji 1.4318 on ostomäärästä riippuen todennäköisesti teräslajia 1.4301 kalliimpaa.

Nykyisin on saatavilla myös korkean kromipitoisuuden teräksiä (n. 20 %) ja nämä teräslajit tullaan sisällyttämään standardeihin EN 10088 käynnissä olevan revision yhteydessä. Teräslaji 1.4420 on esimerkki korkean kromipitoisuuden (ja korkean typpipitoisuuden) teräksestä, jonka korroosionkestävyyden on esitetty vastaavan teräslajin 1.4401 korroosionkestävyyttä. Sen mitoituslujuus 390 N/mm^2 on korkeampi kuin perinteisillä austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä 240 N/mm^2, ja se säilyttää myös sitkeytensä.

Ruostumattomat duplex-teräkset

Ruostumattomat duplex-teräkset soveltuvat korkeaa lujuutta ja korroosionkestävyyttä ja/tai rako- ja jännityskorroosionkestävyyttä edellyttäviin käyttökohteisiin.

Teräslaji 1.4462 on äärimmäisen korroosionkestävä duplex-teräs, joka soveltuu käytettäväksi meriympäristöissä tai muissa vaativissa ympäristöissä. Ruostumattoman teräksen yleistyminen kuormaa kantavissa käyttökohteissa on johtanut duplex-terästen kysynnän kasvuun ja uusien, '*laihempien*' lean duplex-terästen kehittämiseen. Lean teräslajit ovat saaneet nimensä niiden alhaisista ja kustannustehokkaista nikkeli- ja molybdeenipitoisuuksista. Lean duplex teräslajien mekaaniset ominaisuudet ovat verrattavissa teräslajiin 1.4462, ja korroosionkestävyydeltään ne vastaavat yleisimpiä austeniittisia ruostumattomia teräksiä. Lean duplex-teräksiä voidaan siten käyttää monissa rannikolla sijaitsevissa käyttökohteissa. Lean duplex-terästen saatavuuden paranemisen myötä standardiin EN 1993-1-4 (A1:2015) lisättiin neljä uutta duplex-teräslajia.

Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Kaksi yleisintä rakenteissa käytettyä ja helposti saatavilla olevaa ferriittistä ruostumatonta terästä ovat teräslaji 1.4003 (perusferriittinen sisältäen 11 % kromia) ja teräslaji 1.4016 (sisältäen 16,5 % kromia ja jonka korroosionkestävyys on siten teräslajia 1.4003 korkeampi) Hitsaus heikentää teräslajin 1.4016 korroosionkestävyyttä ja iskusitkeyttä merkittävästi.

Nykyaikaiset stabiloidut ferriittiset lajit, kuten 1.4509 ja 1.4521, sisältävät useampia seosaineita, esimerkiksi niobia tai titaania, joilla parannetaan teräksen hitsattavuutta ja muokattavuutta. Teräslaji 1.4521 sisältää 2 % molybdeeniä, mikä parantaa teräksen piste- ja rakokorroosionkestävyyttä kloridipitoisissa käyttöympäristöissä. Teräslajin 1.4521 pistekorroosionkestävyys on verrattavissa teräslajin 1.4401 pistekorroosionkestävyyteen. Teräslaji 1.4621 on viime vuosien aikana kehitetty

ferriittinen 20 % kromia sisältävä teräs, jonka pinnan kiillotettavuus on verrattavissa lajeihin 1.4509 ja 1.4521.

1.3 Ruostumattoman teräksen käyttökohteet rakennusteollisuudessa

Ruostumattomia teräksiä on käytetty rakentamisessa siitä alkaen, kun ne kehitettiin yli sata vuotta sitten. Ruostumattomasta teräksestä valmistetut tuotteet ovat houkuttelevia ja erittäin korroosionkestäviä, hyvät lujuus-, sitkeys- ja väsymisominaisuudet omaavia sekä helppohoitoisia rakennusmateriaaleja. Ruostumattomia teräksiä voidaan työstää useilla yleisillä valmistustekniikoilla ja ne ovat täysin kierrätettävissä käyttöikänsä jälkeen. Ruostumattomat teräkset ovat hyvä valinta käyttösovelluksiin, jotka sijaitsevat aggressiivisissa ympäristöissä. Tällaisia ovat esimerkiksi rakennukset ja rakenteet jotka sijaitsevat rannikolla tai altistuvat jäänpoistosuoloille tai saastuneelle ympäristölle.

Ruostumattoman teräksen hyvä sitkeys on hyödyllinen ominaisuus, kun edellytetään kestävyyttä seismisille kuormille; seismiset käyttösovellukset ovat kuitenkin rajattu tämän ohjeen soveltamisalan ulkopuolelle.

Tyypillisiä käyttösovelluksia austeniittisille ja duplex lajeille ovat:

- Palkit, pilarit, hoitotasot ja tuet vedenpuhdistuslaitoksissa, sellu- ja paperi-, ydin-, biomassa-, kemia-, lääke- ja ruoka- ja juomateollisuudessa
- Siltojen primaaripalkit ja -pilarit, niveltapit, kaiteet, köysien suojaputket ja liikuntasaumat
- Rantavallit, laiturit ja muut rannikolle sijoittuvat rakenteet
- Betonirakenteiden raudoiteteräkset
- Rakennusten verhoukset, vesikatot, katokset ja tunneleiden verhoukset
- Verhousten, muurausten ja tunneliverhousten tuentajärjestelmät
- Turva-aidat, käsijohteet, katukalusteet
- Puu-, kivi-, kallio- ja muurattujen rakenteiden kiinnikkeet ja ankkurointijärjestelmät
- Uimahallirakennusten rakenteelliset osat ja kiinnikkeet (erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteellisiin kokoonpanoihin, joihin uimahallin ilmasta voi kondensoitua kosteutta ja joka voi aiheuttaa jännityskorroosioriskin (ks. kohta 3.5.3)
- Räjähdystä ja törmäystä kestävät rakenteet kuten turvaseinät ja -portit sekä -tolpat
- Palo- ja räjähdysseinät, kaapelihyllyt ja kulkuväylät offshore-porauslautoilla.

Ferriittisiä teräslajeja voidaan käyttää rakennusten päällystämiseen ja kattamiseen. Kuljetusväline sektorilla niitä käytetään kuormaa kantavina rakenneosina, esimerkiksi rakenneputkina linja-autojen rungoissa. Ferriittisillä teräslajeilla on myös pitkä historia kiskoilla kulkevien hiilivaunujen rakenteissa, joissa teräksen kulumiskestävyys on tärkeä ominaisuus. Vaikka ferriittisten ruostumattomien terästen käyttö rakenteellisina osina rakennusteollisuudessa on tällä hetkellä vähäistä, niiden lujuus ja kohtalainen säilyvyys sekä pinnan kiinnostava metallinen viimeistely tekevät niistä potentiaalisen materiaalivaihtoehdon myös rakenteellisiin elementteihin. Pitkää käyttöikää edellyttävissä liittolevyissä tai kohtalaisen korroosiorasituksen käyttöympäristöissä ferriittinen ruostumaton teräs on taloudellisempi vaihtoehto kuin sinkitty teräs, jonka säilyvyys voi heikentyä 25 käyttövuoden jälkeen. Liittorakennevälipohjien lisäksi ferriittiset lajit voivat korvata sinkityn teräksen esimerkiksi muoteissa ja katto-orsissa- sekä kaapelihyllyjen

tukirakenteissa. Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat taloudellinen vaihtoehto käytettäväksi paitsi suljetuissa tai osittain suljetuissa lämmittämättömissä käyttöympäristöissä (esimerkiksi rautateillä, katsomoissa tai pyörävajoissa) sekä myös verhousten tukirakenteissa, tuulipilareissa ja muurauksen tukena.

1.4 Soveltamisala

Käsikirjan tässä osassa esitetyt suositukset soveltuvat rakentamisessa yleisesti käytetyille ruostumattomille teräslajeille. Suositukset on tarkoitettu pääasiassa rakennusten, off-shore rakenteiden ja vastaavien rakenteiden rakenneosien ja sekundääristen rakenneosien suunnitteluun. Näitä suosituksia ei tule soveltaa erikoisrakenteisiin kuten ydinvoimaloiden rakenteisiin tai painelaitteisiin, joille on olemassa erityisiä standardeja ruostumattoman teräksen sovelluksiin.

Nämä ohjeet koskevat materiaalin käyttäytymistä, kylmämuovattujen, hitsattujen ja kuumamuovattujen rakenneosien ja niiden liitosten suunnittelua. Näitä ohjeita sovelletaan austeniittisiin, duplex ja ferriittisiin ruostumattomiin teräksiin. Valetut rakenneosat eivät ole tämän ohjeen sovellusalaan (valetuissa tuotteissa ominaisuudet voivat erota edellä mainituilla tavoilla valmistettujen tuotteiden ominaisuuksista, esimerkiksi austeniittiset ruostumattomat teräsvalut voivat olla hieman magneettisia).

Ohjeet esitetään rajatilamitoituksen muodossa ja yhdenmukaisesti standardin *Eurocode 3: Part 1.4: Design of Steel Structures, General Rules – Supplementary rules for structural stainless steels (EN 1993-1-4) (SFS-EN 1993-1-4 Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt – Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt.)* kanssa, ellei toisin mainita.

1.5 Merkinnät

Tässä käsikirjassa käytetyt merkinnät ovat standardin EN 1993-1-1 *(Eurocode* 3, *Design of steel structures*, Part 1.1 *General rules and rules for buildings*) *(SFS-EN 1993-1-1: Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt)* mukaisia.

Poikkileikkausten merkinnät ja akselit esitetään kuvassa 1.1.

Latinalaiset isot kirjaimet

E Kimmokerroin; kuormien vaikutus
F Vaikutus; voima
G Liukukerroin
I Hitausmomentti
L Pituus; jänneväli, systeemipituus
M Taivutusmomentti
N Aksiaalinen voima
R Kestävyys
V Leikkausvoima
W Taivutusvastus.

Kreikkalaiset isot kirjaimet

Δ Ero (päämerkinnän edessä).

Latinalaiset pienet kirjaimet

a Jäykisteiden välinen etäisyys; hitsin a-mitta

b Leveys
c Etäisyys; ulokkeen leveys
d Halkaisija; syvyys
e Epäkeskisyys; neutraaliakselin siirtymä; päätyetäisyys; reunaetäisyys
f Lujuus (aineen lujuus)
g Rako
h Korkeus
i Hitaussäde; kokonaisluku
k Kerroin; tekijä
l Nurjahduspituus
m Vakio
n Jonkin numero
p Etäisyys; keskiöetäisyys
q Jakaantunut voima
r Säde; juuren säde
s Limitetty etäisyys
t Paksuus
u-u Vahvempi pääjäyhyysakseli
v-v Heikompi pääjäyhyysakseli
w Poikkipinnan painumisesta aiheutuva muodonmuutos
xx, yy, zz Kohtisuorassa toisiaan vastaan olevat akselit.

Kreikkalaiset pienet kirjaimet

α	(alpha)	Suhde; tekijä
β	(beta)	Suhde; tekijä
γ	(gamma)	Osavarmuusluku
ε	(epsilon)	Venymä; tekijä $= \left(\frac{235E}{210000 f_y} \right)^{0.5}$
λ	(lambda)	Hoikkuusluku (hoikkuusluvun päällä oleva viiva tarkoittaa muunnettua hoikkuutta)
ρ	(rho)	Pienennystekijä
σ	(sigma)	Normaalijännitys
τ	(tau)	Leikkausjännitys
φ	(phi)	Suhde
χ	(chi)	Pienennystekijä (nurjahduksessa)
ψ	(psi)	Jännityssuhde; pienennystekijä.

Alaindeksit

a Keskiarvo
b Reunapuristus; nurjahdus; ruuvi
c Bruttopoikkileikkaus
cr Kriittinen
d Suunnittelu
E Euler; sisäinen voima, sisäinen momentti
eff Tehollinen
e Tehollinen (yhdessä muiden alaindeksien kanssa)
el Kimmoteorian mukainen
f Laippa
g Bruttopoikkileikkaus
i, j, k Indeksejä
k Ominaisarvo
LT Kiepahdus
M Taivutusmomentti huomioon ottaen

N Aksiaalinen voima huomioon ottaen
net Nettopinta-ala
o Alku-
pl Plastisuusteorian mukainen
R Kestävyys
r Pienennetty arvo
S Sekantti
s Vetojännitys (jännityspoikkipinta-ala); jäykiste
t Veto; vääntö
u Poikkileikkauksen vahvempi pääjäyhyysakseli; ääriraja
V Leikkausvoima huomioon ottaen
v Leikkaus; poikkileikkauksen heikompi pääjäyhyysakseli
w *U*uma; hitsi; käyristyminen
x Sauvan pituusakseli
y Myötö (taattu arvo); poikkileikkauksen akseli (vahvempi pääjäyhyysakseli epäsymmetrisiä profiileja lukuun ottamatta)
z Poikkileikkauksen akseli; (heikompi pääjäyhyysakseli epäsymmetrisiä profiileja lukuun ottamatta)
σ Normaalijännitys
τ Leikkausjännitys.

1.6 Sauvojen akselit

Akselit ovat yleensä:

x-x Sauvan pituussuuntainen akseli.

y-y Uumaa tai kulmateräksen leveämpää laippaa vastaan kohtisuora poikkileikkauksen akseli.

z-z Uuman tai kulmateräksen leveämmän laipan suuntainen poikkileikkauksen akseli.

Yleensä y-y-akseli on poikkileikkauksen vahvempi pääjäyhyysakseli ja z-z-akseli on poikkileikkauksen heikompi pääjäyhyysakseli. Kulmateräksillä, pääjäyhyysakselit (*u-u* -akseli ja *v-v-akseli)* ovat tietyssä kulmassa *y-y*- ja *z-z*-akseleiden suhteen, ks. kuva 1.1.

Momenttiakseleihin viittaavien alaindeksien osalta sopimus on:

"Käytetään akselia, jonka suhteen momentti vaikuttaa".

Esimerkiksi I-poikkileikkauksen uuman tasossa vaikuttavaa momenttia merkitään M_y:llä, koska se vaikuttaa poikkileikkauksessa sen akselin suhteen, joka on yhdensuuntainen laippojen kanssa.

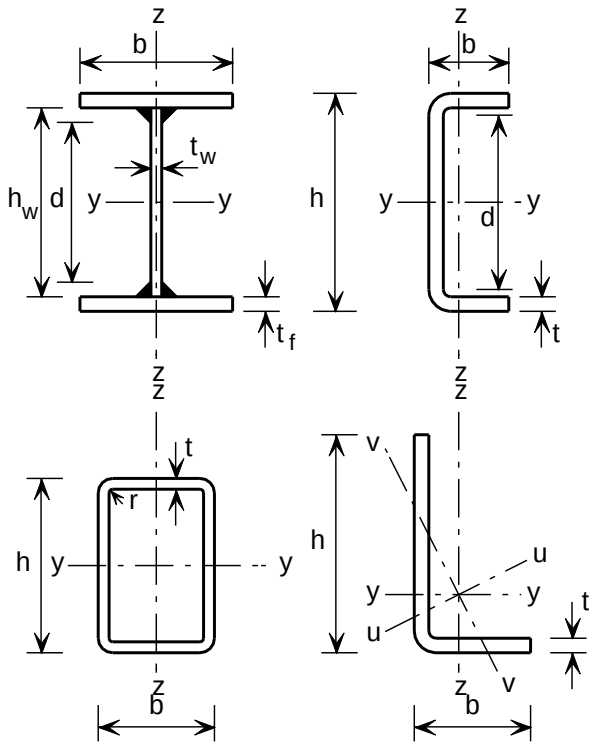
1.7 Yksiköt

Laskelmissa suositellaan käytettäväksi seuraavia yksiköitä:

- voimat ja kuormat kN, kN/m, kN/m^2
- tiheys kg/m^3
- tilavuuspaino kN/m^3
- jännitykset ja lujuudet N/mm^2 (= MN/m^2 tai MPa)

- taivutusmomentit kNm

Eurooppalainen käytäntö on käyttää pilkkua “,” luvun kokonaisosan ja desimaaliosan erottamiseksi toisistaan.



Kuva 1.1 *Poikkileikkausten merkinnät ja akselit*

2 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN OMINAISUUDET

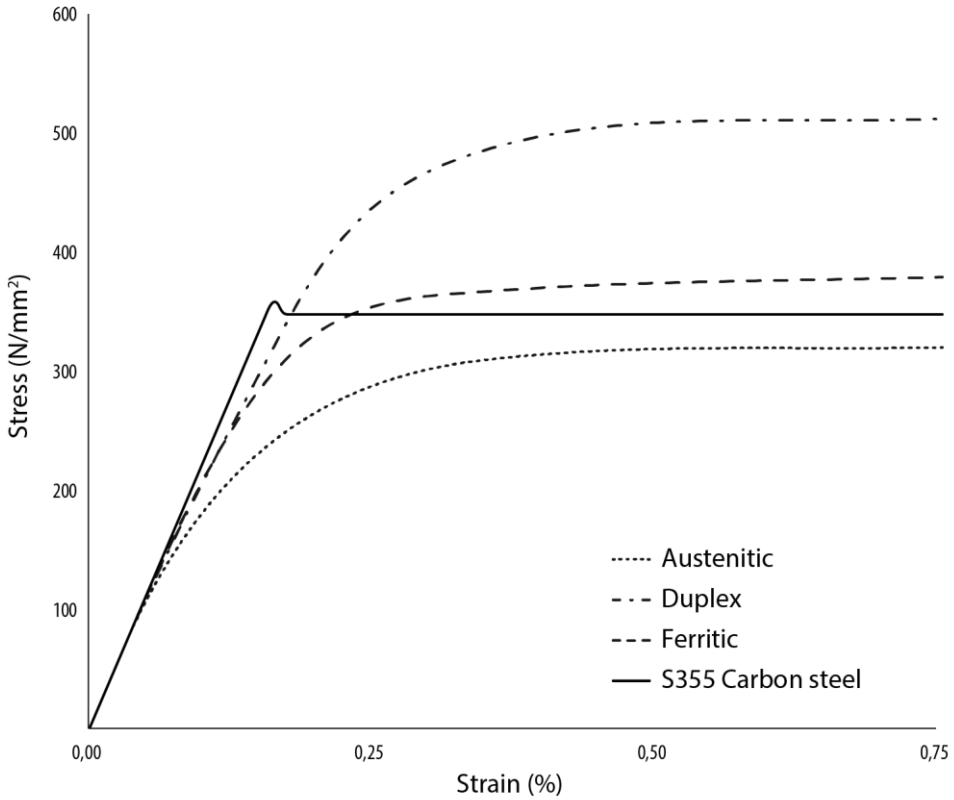
2.1 Jännitys-venymäkäyttäytyminen

Ruostumattoman teräksen jännitys-venymäkäyttäytyminen eroaa hiiliteräksen jännitys-venymäkäyttäytymisestä monin tavoin. Tärkein ero on jännitys-venymäkuvaajan muodossa. Kun hiiliteräs tyypillisesti käyttäytyy lineaarisesti myötörajaan asti ja sen jälkeen jännitys-venymäkuvaaja on tasainen muokkauslujittumiseen asti, on ruostumattoman teräksen jännitys-venymäkäyttäytyminen epälineaarisempi ilman selvästi määritettävää myötörajaa. Kuvassa 2.1 esitetään vertailu ruostumattomien terästen ja hiiliteräksen jännitysvenymäkäyttäytyminen venymään 0,75 % asti, ja kuvassa 2.2 tyypilliset jännitysvenymä-kuvaajat murtoon asti. Kuvissa esitetyt kuvaajat ovat tyypillisiä toimitettaville materiaalilajeille, mutta näitä ei kuitenkaan pidä käyttää suunnittelussa.

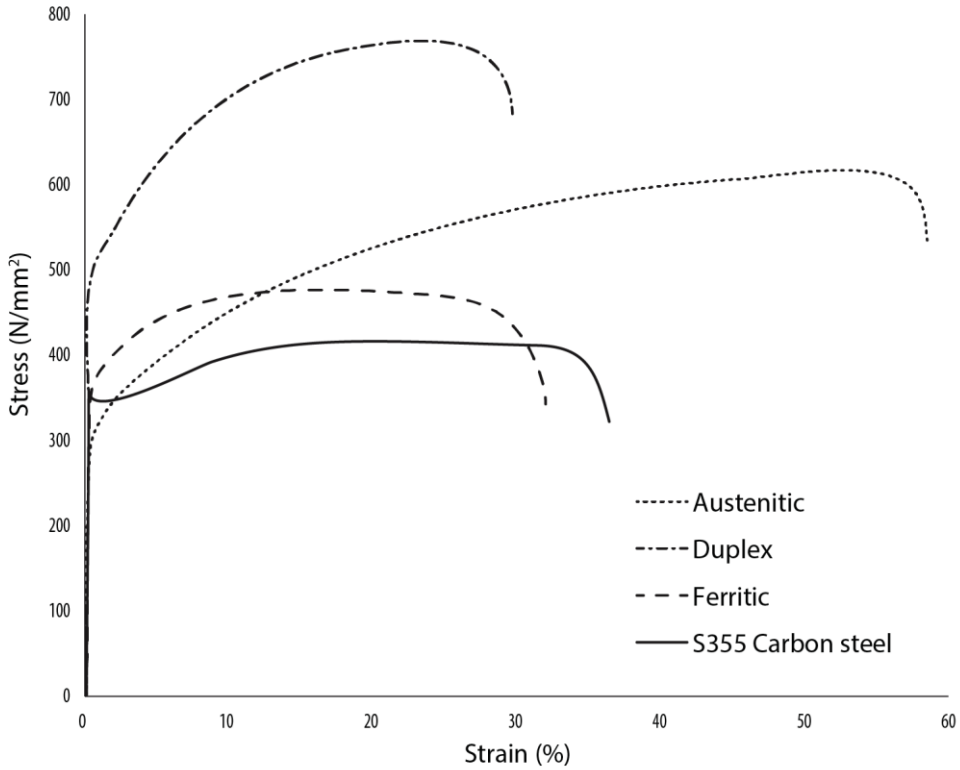
Ruostumattoman teräksen myötörajaksi määritellään yleensä tiettyä pysyvää venymää (perinteisesti 0,2 %:n venymää vastaava arvo) vastaava jännityksen arvo. Kuvassa 2.3 on määritetty 0,2%-raja, josta käytetään myös nimitystä 0,2% pysyvää venymää vastaava myötöraja. Suhteellisuusraja ruostumattomilla teräksillä vaihtelee 40-70 % 0,2%-rajan arvosta.

Huomattavaa on, että ferriittisen ruostumattoman teräksen jännitys-venymä-kuvaaja on austeniittisen ruostumattoman teräksen ja hiiliteräksen kuvaajien välissä siten, että kuvaaja ei ole muodoltaan niin kaareva kuin austeniittisen ruostumattoman teräksen, mutta lujuudeltaan ylittää hiiliteräksen arvot.

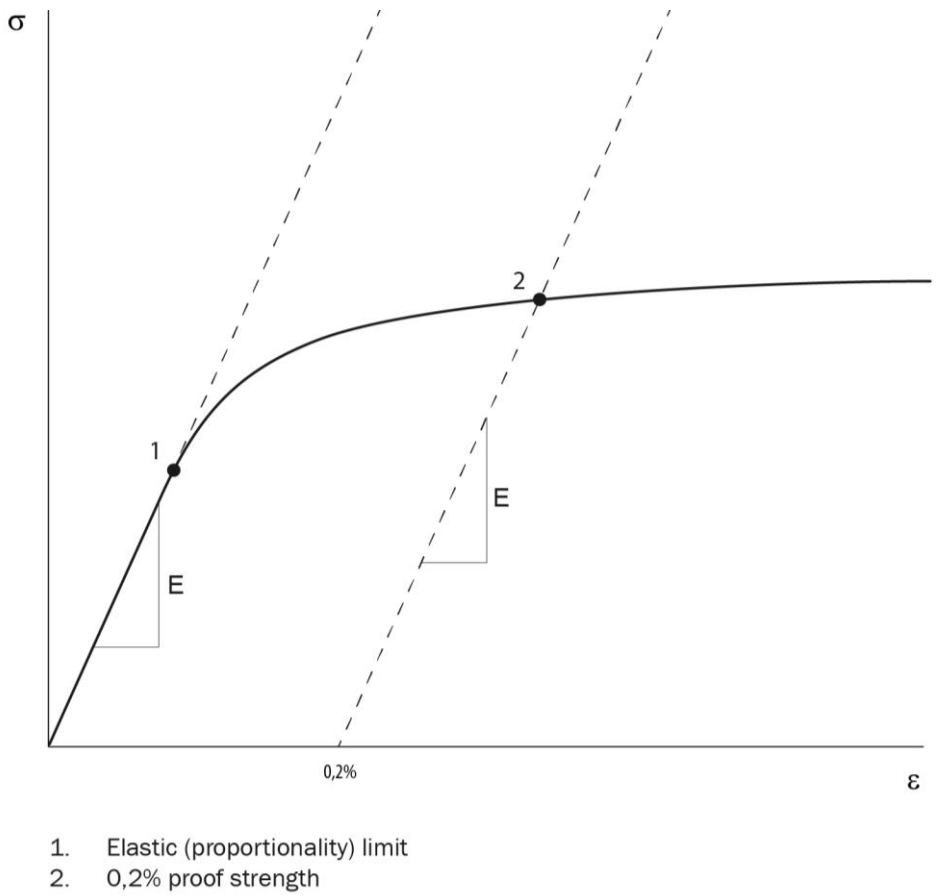
Ruostumattomat teräkset voivat absorboida huomattavasti iskuenergiaa ilman murtumista johtuen niiden hyvästä sitkeydestä (erityisesti austeniittisilla teräksillä) ja niiden muokkauslujittumisominaisuuksista.



Kuva 2.1 *Jännitys-venymä-kuvaajat ruostumattomille terästyypeille ja hiiliteräkselle venymä-asteikolla 0 – 0,75 %*



Kuva 2.2 *Jännitys-venymä-kuvaajat murtoon asti ruostumattomilla terästyypeillä ja hiiliteräksellä*



Kuva 2.3 *Määritelmä 0,2 % - rajalle*

2.2 Jännitys-venymäkäyttäytymiseen vaikuttavat tekijät

Ruostumattomien terästen metallurgia on monimutkaisempaa kuin hiiliterästen ja valmistusprosessilla on suurempi vaikutus lopullisiin ominaisuuksiin.

Tietyt tekijät vaikuttavat ruostumattomien terästyyppien jännitys-venymäkuvaajien muotoon ja nämä tekijät ovat jossain määrin toisistaan riippumattomia.

2.2.1 Kylmämuokkaus

Ruostumaton teräs on yleisesti saatavilla “hehkutetussa tilassa” jolloin se on läpikäynyt lämpökäsittelyprosessin, jossa se on kuumennettu, pidetty tässä lämpötilassa tietyn ajan, ja sen jälkeen nopeasti sammutettu. Hehkuttaminen palauttaa materiaalin pehmeään ja helpommin muovattavaan tilaan.

Kylmämuokkaus, kuten lujuuden kasvattaminen kylmämuovausprosessissa ja levyn suoristus rulla- tai venytysoikaisulla sekä myös valmistuksen aikana, nostaa austeniittisten ja duplex-terästen lujuustasoa. Tähän lujuuden kohoamiseen liittyy sitkeyden heikkeneminen, mutta sen merkitys on yleensä vähäinen erityisesti austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä, koska niiden alkuperäinen sitkeys on suuri.

Ruostumattomia teräksiä voidaan hankkia markkinoilta kylmämuokatussa tilassa (ks. taulukko 2.3). Kylmämuokatun tilan ruostumattoman teräksen hinta on hieman korkeampi kuin vastaavan hehkutetun tilan materiaalin riippuen teräslajista, tuotemuodosta ja kylmämuokkausasteesta.

Kun ruostumatonta terästä kylmämuokataan, teräksen ominaisuudet pyrkivät muuttumaan epäsymmetrisiksi siten, että käyttäytyminen vedossa ja puristuksessa on erilainen ja teräs on anisotrooppinen (erilaiset jännitys-venymäominaisuudet valssaussuunnassa ja valssaussuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa). Epäsymmetrisyyden ja anisotropian aste riippuu teräslajista, kylmämuokkausasteesta ja valmistushistoriasta. Rakenteelliset profiilit, joiden seinämän paksuus on yli 3 mm, on valmistettu lievästi kylmämuokatusta materiaalista ja epäsymmetrian ja anisotropian vaikutukset tällaisen profiilin jännitys-venymä-käyttäytymiseen eivät ole isoja; epälineaarisuudella on huomattavasti merkittävämpi vaikutus. Anisotropia ja epäsymmetrisyys ovat merkittävämpiä suunniteltaessa ohutseinämäisiä, voimakkaasti muokattuja profiileja.

Kylmämuokatussa tilassa olevan materiaalin pituussuuntainen puristuslujuus on pienempi kuin poikittais- ja pitkittäissuuntainen vetolujuus (arvot, jotka perinteisesti on esitetty materiaalistandardeissa kuten EN 10088 ja vastaavasti valmistajan ilmoittamat). Tästä syystä mitoituslujuuden valintaan tulee kiinnittää huomiota käytettäessä kylmämuokatun tilan materiaaleja (ks. taulukko 2.3).

Kun profiileja valmistetaan kylmämuovaamalla, prosessin aikana materiaalissa tapahtuu plastisia muodonmuutoksia, joiden vaikutuksesta 0,2%-rajan lujuus kohoaa huomattavasti. Lujuuden lisäys voi tyypillisesti olla 50 % poikkileikkauksen kylmämuokatuilla nurkka-alueilla; materiaalin lujuuden kohoamista tapahtuu myös tasomaisilla alueilla. Valmistuksen aikaisen lujuuden kohoaminen voidaan määrittää liitteessä B annetun ohjeistuksen mukaisesti. Vaihtoehtoisesti lujuuden kohoaminen voidaan todentaa kokeellisesti (ks. kohta 10).

Kylmämuovauksen jälkeen tapahtuva kylmämuovatun rakenneosan hitsaaminen pehmentää ko. kohtaa paikallisesti aiheuttaen kohonneen lujuuden pienenemistä (ja myös pienentää anisotropiaa). Kohdassa 7.4.4 esitetään ohjeita hitsattujen kiinnitysten suunnittelusta, kun kylmämuokattuja rakenneosia liitetään toisiinsa.

2.2.2 Kuormitusnopeus

Kuormitusnopeus vaikuttaa ruostumattomiin teräksiin merkittävämmin kuin hiiliteräksiin. Ruostumattomalle teräkselle saadaan suhteellisesti suurempi lujuus nopeassa kuormituksessa kuin hiiliteräkselle.

2.3 Sovellettavat standardit ja suunnittelulujuudet

2.3.1 Litteät ja pitkät tuotteet

Sovellettava materiaalistandardi EN 10088, *Stainless steels (SFS-EN 10088 Ruostumattomat teräkset)* sisältää viisi osaa, joista kolmea sovelletaan rakentamisen käyttösovelluksissa:

- Standardi *SFS-EN 10088-1: Ruostumattomat teräkset. Osa 1: Ruostumattomien terästen luettelo* esitetään ruostumattomat teräkset, niiden kemiallinen koostumus ja joidenkin fysikaalisten ominaisuuksien, kuten kimmokerroin E, arvoja.
- Standardi *SFS-EN 10088-4 Ruostumattomat teräkset. Osa 4. Rakennuskäyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot.*
- Standardi *SFS-EN 10088-5 Ruostumattomat teräkset. Osa 5. Rakennuskäyttöön tarkoitetut korroosionkestävät tangot, valssilangat, langat, profiilit ja kirkkaat tuotteet. Tekniset toimitusehdot.*

Standardit EN 10088-4 ja -5 ovat harmonisoituja tuotestandardeja ja näiden mukaisesti spesifioitu ruostumaton teräs toimitetaan CE-merkinnällä. Valmistaja ilmoittaa, että ruostumaton teräs on aiottuun käyttöön soveltuva. CE-merkintä tarkoittaa, että tuote on käytettävän standardin mukainen, täyttää kyseisessä standardissa vaaditut kynnysarvot (esim. minimi paksuus tai lujuus) ja että se on toimitettu vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyjen mukaisesti.

Merkintä ja koostumus

Standardissa EN 10088(osat) käytetty merkintäjärjestelmä vastaa eurooppalaista teräksen numeroon ja nimeen perustuvaa järjestelmää.

Esimerkiksi teräslajin 1.4307 numero sisältää seuraavat asiat:

1.	**43**	**07**
Tarkoittaa terästä	Tarkoittaa ruostumattomien terästen yhtä ryhmää	Yksittäisen teräslajin tunnus

Ruostumattomien terästen ryhmät on merkitty standardissa EN 10027-2 seuraavasti:

1.40XX Ruostumaton teräs seostettu Ni < 2,5 % mutta Mo, Nb ja Ti eivät ole seosaineina.

1.41XX Ruostumaton teräs seostettu Ni < 2,5 % ja Mo mutta Nb ja Ti eivät ole seosaineina.

1.43XX Ruostumaton teräs seostettu Ni ≥ 2,5 % mutta Mo, Nb ja Ti eivät ole seosaineina.

1.44XX Ruostumaton teräs seostettu Ni ≥ 2,5 %, ja Mo mutta Nb ja Ti eivät ole seosaineina.

1.45XX Erikoisseostetut ruostumattomat teräkset

1.46XX Kemiallisesti kestävät ja korkealämpötila Ni-seostetut teräkset

Teräksen nimijärjestelmä sisältää perustietoa teräksen koostumuksesta. Numeroa 1.4307 vastaavan teräksen nimi on X2CrNi18-9, missä:

X	**2**	**CrNi**	**18-9**
Tarkoittaa runsaasti seostettua terästä	Hiilipitoisuus-% 100-kertaisena	Pääseosaineiden kemiallinen merkintä	Pääseosaineiden pitoisuus %:na

Jokaisella ruostumattomalla teräksellä on yksikäsitteinen numero. Liitteen A taulukossa esitetään toisiaan vastaavien teräslajien merkinnät joidenkin eurooppalaisten ja amerikkalaisten standardien mukaan.

Taulukossa 2.1 esitetään yleisimpien ruostumattomien terästen kemiallinen koostumus.

Lujuus

Mitoituslaskelmissa karakteristisen myötölujuuden f_y ja karakteristisen vetomurtolujuuden f_u arvoina käytetään standardissa EN 10088-4 ja 5 esitettyjä minimiarvoja 0,2 % rajalle ($R_{p0,2}$) ja vetomurtolujuudelle (R_m) (ks. taulukko 2.2). Näitä arvoja käytetään hehkutetun tilan materiaaleille ja ne ovat konservatiivisia materiaalille ja profiileille, joita on kylmämuokattu valmistusprosessissa.

Austeniittisten ruostumattomien terästen mitattu myötölujuuden arvo voi olla 25 – 40 % korkeampi kuin materiaalille määritetty minimiarvo, kun levynpaksuus on alle 25 mm. Duplex ruostumattomille teräksille marginaali on pienempi, arviolta 5 – 20 %. Aineenpaksuuden tai halkaisijan ja myötölujuuden välillä on käänteinen yhteys siten, että ohuemmilla paksuuksilla on tyypillisesti standardin edellyttämää minimiarvoa merkittävästi korkeampi myötölujuuden arvo, kun taas paksummilla kuin 25 mm materiaaleilla, myötölujuuden arvot ovat yleensä hyvin saman suuruisia kuin standardin edellyttämä minimiarvo myötölujuudelle.

Ulkotiloissa hyvin kuumassa ilmanalassa sijaitseville rakenteille on syytä ottaa huomioon lämpö, joka ruostumattomaan teräkseen voi siirtyä ympäristöstä. Pienemmät ja varjossa olevat rakenneosat voivat jäädä ympäristön lämpötilaan, kun taas suoralle auringon paisteelle altistuvien suurempien ruostumattomien teräspintojen lämpötila voi nousta jopa 50 % korkeammiksi kuin ympäristön lämpötila. Historiaan perustuvia säätietoja voi löytää lähteistä kuten www.weatherbase.com. Jos ruostumattoman teräksen maksimilämpötila todennäköisesti saavuttaa 60 °C, on syytä redusoida huoneenlämpötilan myötölujuuden arvoa 5 %; mikäli lämpötila on korkeampi, tarvitaan suurempi reduktio.

Taulukko 2.1 *Kemiallinen koostumus standardin EN 10088 mukaisesti*

	Teräs-laji	Seosainepitoisuus painoprosenttina (suurin arvo ja sallittu alue)				
		C	Cr	Ni	Mo	Muut
Austeniittiset teräkset	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 [1]
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 [1]
Duplex teräkset	1.4062	0,03	21,5 – 24,0	1,0 – 2,9	0,45	N: 0,16 – 0,28
	1.4162	0,04	21,0 – 22,0	1,35 – 1,7	0,1 – 0,8	N: 0,2 – 0,25 Cu: 0,1 – 0,8
	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 0,1 – 0,6
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22
	1.4482	0,03	19,5 – 21,5	1,5 – 3,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 1,0
	1.4662	0,03	23,0 – 25,0	3,0 – 4,5	1,0 – 2,0	N: 0,2 – 0,3 Cu: 0,1 – 0,8
Ferriittiset teräkset	1.4003	0,03	10,5 – 12,5	0,3 – 1,0	-	
	1.4016	0,08	16,0 – 18,0	-	-	
	1.4509	0,03	17,5 – 18,5	-	-	Ti: 0,1 – 0,6 Nb: [3xC+0,3] – 1,0
	1.4521	0,025	17,0 – 20,0	-	1,8 – 2,5	Ti: [4x(C+N)+0,15] – 0,8 [2]
	1.4621	0,03	20,0 – 21,5	-	-	N: 0,03 Nb: 0,2 – 1,0 Cu: 0,1 – 1,0

Taulukko 2.2 *EN 10088 mukaisten yleisten ruostumattomien terästen myötölujuuden f_y ja murtolujuuden f_u nimelliset arvot (N/mm^2)*

	Teräs-laji	Tuotemuoto							
		Kylmävalssattu nauha		Kuumanvalssattu nauha		Kuumavalssattu levy		Tangot, langat & Profiilit	
		Nimellinen paksuus *t*							
		$t \leq 8$ mm		$t \leq 13{,}5$ mm		$t \leq 75$ mm		t tai $\phi \leq 250$ mm	
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
Austeniittinen	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	500
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
Duplex	1.4062	530 [1]	700 [1]	480 [2]	680 [2]	450	650	380 [3]	650 [3]
	1.4162	530 [1]	700 [1]	480 [2]	680 [2]	450	650	450 [3]	650 [3]
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 [3]	600 [3]
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 [3]	650 [3]
	1.4482	500 [1]	700 [1]	480 [2]	660 [2]	450	650	400 [3]	650 [3]
	1.4662	550 [1]	750 [1]	550 [4]	750 [4]	480	680	450 [3]	650 [3]
Ferriittinen	1.4003	280	450	280	450	250 [5]	450 [5]	260 [6]	450 [6]
	1.4016	260	450	240	450	240 [5]	430 [5]	240 [6]	400 [6]
	1.4509	230	430	-	-	-	-	200 [7]	420 [3]
	1.4521	300	420	280	400	280 [8]	420 [8]	-	-
	1.4621	230 [5]	400 [9]	230 [8]	400 [8]	-	-	240 [7]	420 [7]

Ominaisuuksille f_y ja f_u tässä taulukossa annettuja nimellisiä arvoja voidaan käyttää suunnittelussa ilman, että tarvitsee kiinnittää erityisesti huomiota anisotropian ja myötölujittumisen vaikutuksiin. Ferriittisille ruostumattomille teräksille standardissa EN 10088-4 annetaan ominaisuudelle f_y arvot pituus- ja poikittaissuunnassa. Tässä taulukossa annetut pituussuunnan arvot ovat yleisesti noin 20 N/mm^2 alhaisemmat kuin poikittaissuunnan arvot.

Teräslajit 1.4621, 1.4482, 1.4062 ja 1.4662 sisältyvät vain standardeihin EN 10088-2 ja 3.

Teräslajista 1.4509 valmistetut tangot sisältyvät vain standardiin EN 10088-3.

1	$t \leq 6{,}4$ mm	4	$t \leq 13$ mm	7	t tai $\phi \leq 50$ mm
2	$t \leq 10$ mm	5	$t \leq 25$ mm	8	$t \leq 12$ mm
3	t tai $\phi \leq 160$ mm	6	t tai $\phi \leq 100$ mm	9	$t \leq 6$ mm

Kylmämuokatut teräkset voidaan eritellä standardien EN 10088 mukaisesti joko minimi 0,2 % rajan (esim. kylmämuokatut tilat CP350, CP 500, jne.) tai murtolujuuden (esim. kylmämuokkaus tilat C700, C850, jne.) suhteen, mutta vain yhden parametrin suhteen. Koska rakenteellinen suunnittelu edellyttää lähes tulkoon aina myötölujuuden f_y minimiarvon käyttöä, standardi EN 1993-1-4 sallii suunnittelun perustuen ainoastaan kylmämuokattuihin tiloihin CP350 ja CP500 (Taulukko 2.3). Karakteristinen myötölujuuden minimiarvo f_y on 350 N/mm^2

kylmämuokatussa tilassa CP350. Kylmämuokatussa tilassa CP500 epäsymmetria otetaan huomioon tarkasteltaessa pituussuuntaista kestävyyttä (esim. pilarin stabiliteetti tai palkin taivutus) pienentämällä karakteristinen myötölujuuden arvo 500 N/mm^2 arvoon 460 N/mm^2 (ks. kohta 2.2). Korkeampaa pituussuuntaisen lujuuden arvoa puristukselle voidaan käyttää perustuen kokeelliseen todentamiseen.

Kun kylmämuokkaustila on korkeampi kuin CP500, suunnittelu tulee tehdä perustuen kokeelliseen todentamiseen kohdan 10 mukaisesti.

Suorakaiteen muotoisia rakenneputkia on saatavissa kylmämuokatussa tilassa lujuusluokissa, jotka ovat luokkien CP350 ja CP500 välissä ja joille valmistaja takaa 0,2-rajan (koskee sekä vetoa että puristusta) ja vetomurtolujuuden.

Taulukko 2.3 *Standardin EN 10088(osat) mukaisten yleisten ruostumattomien terästen myötölujuuden f_y ja murtolujuuden f_u nimelliset arvot [N/mm^2] kylmämuokatussa tilassa.*

Teräslaji	Kylmämuokkaustila			
	CP350		CP500	
	f_y N/mm^2	f_u [1] N/mm^2	f_y N/mm^2	f_u [1] N/mm^2
1.4301	350	600	460	650
1.4318	[2]	[2]	460	650
1.4541	350	600	460	650
1.4401	350	600	460	650
1.4571	350	600	460	650

[1] Standardin EN 10088 mukaisesti CP-luokitus määrittää ainoastaan vaadittavan 0,2 % rajan f_y arvon. Terästen vetomurtolujuuden ilmoitettavan arvon tulee vastata taulukossa esitettyä konservatiivista arvoa, ellei tyyppitestauksella voida hyväksyä alhaisempaa arvoa.

[2] Teräslajin 1.4318 0,2 %-raja 350 N/mm^2 on jo hehkutetun tilan materiaalilla; ks. taulukko 2.2.

Kimmokerroin

Rakenteellisessa suunnittelussa kimmokertoimen arvona suositellaan käytettäväksi arvoa 200×10^3 N/mm^2 kaikille ruostumattomille teräksille.

Standardeissa EN 1993-1-4 ja EN 10088-1 rakennesuunnittelussa käytettävä kimmomodulin arvo on 200×10^3 N/mm^2 kaikille perusausteniittisille ja duplex teräslajeille. Ferriittisille teräslajeille käytetään arvoa 220×10^3 N/mm^2. Kuitenkin tutkimusaineisto ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä ovat johdonmukaisesti osoittaneet, että arvo 200×10^3 N/mm^2 olisi soveltuvampi ja oletettavasti EN 1993-1-4 revision yhteydessä tätä arvoa suositellaan käytettäväksi kaikkien ruostumattomien teräslajien mitoitukseen.

Taipumien laskentaan käytetään sekanttimodulia, ks. kohta 6.4.6. Poisson-vakion arvo on 0,3 ja liukumodulin G arvo 76,9×10^3 N/mm^2.

2.3.2 Rakenneputket

Poikkileikkaukseltaan pyöreille ruostumattomille putkille on kaksi standardia, joissa esitetään tekniset ominaisuudet ja kemiallinen koostumus:

EN 10296-2 *Hitsatut pyöreät teräsputket yleiseen käyttöön. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Ruostumattomat teräkset.*

EN 10297-2 *Saumattomat pyöreät teräsputket yleiseen käyttöön. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Ruostumattomat teräkset.*

Suorakaiteen ja neliön muotoisille ruostumattomille rakenneputkille ei ole vastaavaa standardia.

Ruostumattomasta teräksestä rakenteelliseen käyttöön valmistettaville rakenneputkille (poikkileikkaukseltaan suorakulmaiset, neliömäiset ja pyöreät) on valmisteilla eurooppalainen standardi. Ennen kuin standardi valmistuu, rakenteelliseen käyttöön tarkoitetun ruostumattoman rakenneputken kemiallinen koostumus ja lujuus määräytyvät standardin EN 10088(osat) tai tämän käsikirjan mukaisesti sekä geometriatoleranssit vastaavan rakenneterässtandardin mukaisesti.

2.3.3 Ruuvit

Ruostumattomista teräksistä tehtyjä ruuveja käsitellään standardissa EN ISO 3506, *Corrosion-resistant stainless steel fasteners*. Tässä luvussa esitettävä informaatio perustuu standardin EN ISO 3506 revisioitavana olevaan version, joka on tarkoitus julkaista vuoden 2017 aikana. Ko. standardeissa esitetään austeniittisten, martensiittisten, ferriittisten ja duplex-kiinnittimien kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet. Vaihtoehtoisia, standardissa määrittelemättömiä teräslajeja voidaan käyttää edellyttäen, että ne täyttävät fysikaalisille ja mekaanisille ominaisuuksille asetetut vaatimukset ja että niillä on vastaavat korroosionkestävyysominaisuudet.

Standardin EN ISO 3506 mukaan ruuvien ja muttereiden materiaali luokitellaan kirjaimin seuraavasti: “A” tarkoittaa austeniittisia, “F” tarkoittaa ferriittisiä, “C” tarkoittaa martensiittisia ja ”D” duplex ruostumattomia teräksiä. Rakenteellisissa sovelluksissa suositellaan käytettäväksi austeniittisia tai duplex-ruuveja. Kirjainta seuraa numero (1, 2, 3, 4, 5, 6 tai 8), joka viittaa korroosionkestävyyteen siten, että luku 1 tarkoittaa alinta ja luku 8 parhainta korroosionkestävyyttä. Taulukko 2.4 esitetään austeniittisten ja duplex ruostumattomien ruuvien kemiallinen koostumus ja taulukossa 2.5 esitetään kiinnittimissä käytettävien ruostumattomien terästen merkinnät luokittain.

Taulukko 2.4 *Ruuvien kemiallinen koostumus EN ISO 3506 mukaisesti*

Teräs-laji		Kemiallinen koostumus [a] paino, %										Muut seosaineet ja huomautukset
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	
Austeniittinen	**A1**	0,12	1,0	6,5	0,020	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2,25	—	b, c, d
	A2	0,10	1,0	2,0	0,050	0,03	15-20	— [e]	8-19	4	—	f, g
	A3	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	17-19	— [e]	9-12	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 ja/tai 10C ≤ Nb ≤ 1,0
	A4	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10-15	4	—	g, h
	A5	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10,5-14	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 ja/tai 10C ≤ Nb ≤ 1,0 h
	A8	0,03	1,0	2,0	0,040	0,03	19-22	6,0-7,0	17,5-26	1,5	—	—
Duplex	**D2**	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	19-24	0,10-1,0	1,5-5,5	3	0,05-0,20	Cr+3,3Mo+16N ≤24 [j]
	D4	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	21-25	0,10-2,0	1,0-5,5	3	0,05-0,30	24 < Cr+3,3Mo+16N [j]
	D6	0,03	1,0	2,0	0,040	0,015	21-26	2,5-3,5	4,5-7,5	—	0,08-0,35	—
	D8	0,03	1,0	2,0	0,035	0,015	24-26	3,0-4,5	6,0-8,0	2,5	0,20-0,35	W ≤ 1,0

a Arvot ovat maksimiarvoja, ellei muuta esitetä.

b Seleeniä voidaan käyttää korvaamaan rikki, kuitenkin kyseessä olevan maan tai alueen kansalliset säädökset tulee ottaa huomioon.

c Jos nikkelin määrä on vähemmän kuin 8 %, mangaanin minimipitoisuus tulee olla 5 %.

d Kuparin pitoisuuden minimimäärälle ei ole asetettu rajoitusta edellyttäen, että nikkeli pitoisuus on 8 %.

e Voi sisältää molybdeeniä valmistajan harkinnan mukaisesti. Kuitenkin, jos käyttösovelluksessa edellytetään molybdeenin rajoittamista, tilaajan tulee sopia tästä tilauksen yhteydessä.

f Jos kromin pitoisuus on alle 17 %, nikkelin minimipitoisuus on 12 %.

g Austeniittiset ruostumattomat teräkset joiden hiilipitoisuus on korkeintaan 0,030 %, voidaan seostaa typellä, mutta typpipitoisuus ei voi ylittää määrää 0,22 %.

h Valmistajan harkinnan mukaisesti hiilipitoisuus voi olla korkeampi, jotta voidaan saavuttaa suurempi halkaisijaisille ruuveille vaaditut mekaaniset ominaisuudet ja kun suuremmasta hiilipitoisuudesta on sovittu tilauksen yhteydessä, mutta hiilipitoisuus ei voi ylittää määrää 0,12 % austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä.

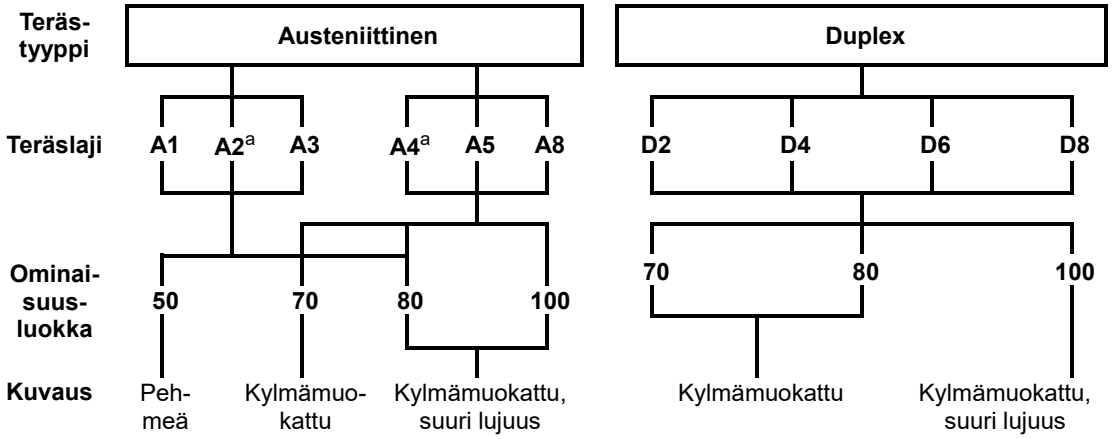
j Kyseistä kaavaa käytetään duplex ruostumattomien terästen luokittelemiseksi tämän standardin mukaisesti; kaavaa ei ole tarkoitettu käytettäväksi valintaperusteena korroosionkestävyydelle.

Taulukko 2.5 *Yleinen kiinnittimien merkintä ruostumattomille teräksille*

Terästyyppi	ISO 3506 luokka	Vastaavuus teräslajiin	Kommentti
Austeniittinen	A1	1.4570, 1.4305	Suunniteltu koneistettavaksi [1]
	A2	1.4301, 1.4307	Perusausteniittinen
	A3	1.4541, 1.4550	Stabiloitu perusausteniittinen
	A4	1.4401, 1.4404	Molybdeeniseosteinen austeniittinen
	A5	1.4571	Stabiloitu molybdeeniseosteinen austeniittinen
	A8	1.4529, 1.4547	Super austeniittinen
Duplex	D2	1.4482, 1.4362	Lean duplex
	D4	1.4162, 1.4062	Lean duplex
	D6	1.4462	Perus duplex
	D8	1.4410, 1.4501, 1.4507	Super duplex

[1] Korkea rikkipitoisuus heikentää teräksen korroosionkestävyyttä verrattuna teräkseen, jonka rikkipitoisuus on normaalitasolla. Spesifioidaan harkiten.

Kuvassa 2.4 esitetään austeniittisista ja duplex ruostumattomista teräksistä valmistetuille ruuveille käytettävä merkintäjärjestelmä ja ominaisuusluokat (lujuusluokat). Mekaanisen kestävyyden ominaisuusluokkien mukaiset arvot saadaan aikaiseksi yleisesti kylmämuokkaamalla säätämällä kylmämuokkausastetta. Taulukossa 2.4 esitetään mekaaniset ominaisuudet jokaiselle ominaisuusluokalle. Ominaisuusluokan 50 austeniittiset ruuvit ovat ei-magneettisia, mutta korkeamman ominaisuusluokan ruuvit voivat osoittautua lievästi magneettisiksi.



a Matalahiilinen austeniittinen ruostumaton teräs, jonka hiilipitoisuus ei ylitä määrää 0,030 % voidaan merkitä lisämerkinnällä "L" teräslajin merkinnän jälkeen. Esimerkki **A4L–80**.

Kuva 2.4 *Ruostumattomien teräslajien merkintäjärjestelmä ja ominaisuusluokat kiinnittimille.*

Ominaisuusluokan 50 teräksen tila on pehmeä. Ominaisuusluokan 70 kiinnittimet on valmistettu kylmävedetystä tangosta. Ominaisuusluokan 80 kiinnittimet on valmistettu erittäin voimakkaasti kylmävedetystä tangosta. Tangon kylmämuokkauksella saattaa olla hieman vaikutusta korroosionkestävyyteen. Ominaisuusluokan 50 ruuvien kierteet valmistetaan koneistamalla ja ne ovat alttiimpia kierteen kitkasyöpymiselle, ks. kohta 11.7.

Ruostumattomasta teräksestä valmistetun kiinnittimen korroosionkestävyyden pitäisi olla vähintään vastaava kuin kiinnitettävän materiaalin, esimerkiksi teräslajin A2 ruuvia (tai paremman korroosionkestävyyden) voidaan käyttää teräslajin 1.4301 materiaalin kiinnittämiseen, teräslajin A4 ruuvia (tai paremman korroosionkestävyyden) käytetään teräslajin 1.4404 kiinnittämiseen.

Ruuvin veto- tai leikkaus tai yhdistetyn veto- ja leikkauskestävyyden määrittämisessä ruuvin lujuutena f_{ub} käytetään taulukossa 2.4 ominaisuusluokille esitettyjä murtolujuuden R_{m} minimiarvoja.

Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä ei ole havaittu vetyhaurautta, kuten ei myöskään duplex teräksillä, jotka on valmistettu tavanomaisen laadunvalvonnan tason mukaisesti. Muutamissa tapauksissa jolloin vetyhaurautta on esiintynyt duplex teräksillä, se on liitetty joko riittämättömään tuotannon valvontaan tai epätavallisiin käyttöolosuhteisiin. Mahdollinen riski vetyhauraudella pitäisi arvioida korkealujuus teräksistä valmistetuille kokoonpanoille kuten ruuvit, joiden lujuus on korkeampi kuin ominaisuusluokka 80.

Taulukko 2.6 *Mekaanisten ominaisuuksien minimiarvot austeniittisille ja duplex ruostumattomasta teräksestä valmistetuille ruuveille, ohutlevyruuveille ja niiteille.*

Terästyyppi	Teräslaji	Ominaisuusluokka	Murtolujuus, R_m MPa	Jännitys 0,2 % pysyvää venymää vastaten, R_{pf} MPa	Murtovenymä mm
Austeniittinen	A1, A2, A3, A5	50	500	210	0,6 *d*
		70	700	450	0,4 *d*
		80	800	600	0,3 *d*
	A4	50	500	210	0,6 *d*
		70	700	450	0,4 *d*
		80	800	600	0,3 *d*
		100	1000	800	0,2 *d*
	A8	70	700	450	0,4 *d*
		80	800	600	0,3 *d*
		100	1000	800	0,2 *d*
Duplex	D2, D4 D6, D8	70	700	450	0,4 *d*
		80	800	600	0,3 *d*
		100	1000	800	0,2 *d*

2.3.4 Iskusitkeys

Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä ei esiinny muutosta sitkeästä hauraaksi; niiden iskusitkeys vähitellen heikkenee lämpötilan laskiessa. Niitä käytetäänkin yleisesti erittäin mataliin lämpötiloihin suunniteltavissa rakenteissa. Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on osoitettu olevan riittävä iskusitkeys lämpötilaan -40°C asti.

Duplex ja ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä esiintyy muuttuminen sitkeästä hauraaksi. Lean duplex teräksille on osoitettu riittävä iskusitkeys lämpötilaan -40 °C asti. Enemmän seostetuilla duplex teräslajeilla kuten 1.4462 on vielä parempi iskusitkeys kuin edellä esitetty.

Testaukset ferriittisillä teräslajeilla ovat osoittaneet, että ne säilyvät sitkeinä sisätilojen lämpötiloissa. Teräslajin 1.4003 mikrorakenne on kehitetty poikkeavaksi muihin ferriittisiin teräksiin verrattuna ja tällä teräslajilla on huomattavasti parempi iskusitkeys; se on ferriittisistä lajeista soveltuvin rakenteellisiin käyttösovelluksiin, joihin edellytetään suurempia seinämän paksuuksia. Aineenpaksuudeltaan yli 3 mm paksuisen teräslajin 1.4016 käyttöä ei suositella sellaisiin käyttökohteisiin, joissa ympäristön lämpötila voi laskea alle 0°C:n. Teräslajeille 1.4509, 1.4521 ja 1.4621 suurin suositeltava aineenpaksuus on 2 mm kun ympäristön lämpötila on alle 0°C:n.

Ruostumattomilla teräksillä ei ole todettu tapahtuvan paksuussuuntaista lamellirepeämää.

2.4 Fysikaaliset ominaisuudet

Taulukossa 2.7 esitetään tässä käsikirjassa käsiteltävien standardin EN 10088 mukaisten hehkutettujen terästen fysikaalisia ominaisuuksia. Fysikaaliset

ominaisuudet voivat vaihdella jonkin verran riippuen tuotemuodosta ja tuotteen koosta, mutta ko. vaihtelut eivät yleensä ole kriittisiä erilaisissa tuotesovellutuksissa.

.

Taulukko 2.7 *Huoneenlämpötilan fysikaaliset ominaisuudet, hehkutettu tila*

Teräs-tyyppi	Teräs laji	Tiheys (kg/m^3)	Lämpöpitene-minen 20 – 100^{0}C (10^{-6}/°C)	Lämmönjoh-tavuus (W/m°C)	Ominais-lämpö (J/kg°C)
Austeniittinen	1.4301	7900	16	15	500
	1.4307	7900	16	15	500
	1.4401	8000	16	15	500
	1.4318	7900	16	15	500
	1.4404	8000	16	15	500
	1.4541	7900	16	15	500
	1.4571	8000	16,5	15	500
Duplex	1.4062	7800	13	15	480
	1.4162	7700	13	15	500
	1.4362	7800	13	15	500
	1.4482	7800	13	13	500
	1.4462	7800	13	15	500
	1.4662	7700	13	15	500
Ferriittinen	1.4003	7700	10,4	25	430
	1.4016	7700	10	25	460
	1.4509	7700	10	25	460
	1.4521	7700	10,4	23	430
	1.4621	7700	10	21	460
Hiiliteräs	S355	7850	12	53	440

Taulukosta 2.7 on huomattavissa, että lämpöpitenemiskertoimen arvo austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä on n. 30 % suurempi kuin hiiliteräksillä. Kun austeniittisia ruostumattomia teräksiä käytetään yhdessä hiiliterästen kanssa, erilainen lämpölaajeneminen huomioidaan suunnittelussa. Austeniittisten ja duplex ruostumattomien terästen lämmönjohtavuus on n. 30 % hiiliteräksen arvosta. Ferriittisillä teräslajeilla on korkeampi lämmönjohtavuus, joka on n. 50 % hiiliteräksen arvosta. Ferriittisten teräslajien lämpölaajeneminen on huomattavasti vähäisempää kuin austeniittisten teräslajien ja on suunnilleen saman suuruinen kuin hiiliteräksillä.

Duplex ja ferriittiset ruostumattomat teräslajit ovat magneettisia, kun taas hehkutetun tilan austeniittiset ruostumattomat teräslajit lähtökohtaisesti ovat ei-magneettisia. Kohteisiin, joihin edellytetään erittäin matalan magneettisen

permeabiliteetin omaavia teräksiä, voidaan valita tiettyjä austeniittisia teräslajeja. Käytettäessä näitä teräslajeja, hitsausaineen valinta tulee tehdä huolella, jotta voidaan välttää ferriitin muodostumista hitsiin. Soveltuvat hitsiaineet jähmettyvät 100 % austeniittisiksi. Voimakas kylmämuokkaus, erityisesti vähän seostetuilla teräslajeilla, saattaa korottaa magneettisen permeabiliteetin arvoa; kylmämuokkauksen jälkeen suoritettu hehkutus palauttaa ei-magneettisen tilan.

2.5 Lämpötilan vaikutukset

Austeniittisia teräksiä käytetään kylmälaitesovellutuksissa. Korkeissa lämpötiloissa austeniittiset teräslajit säilyttävät hiiliteräksiä paremmin lujuutensa, kun lämpötila on korkeampi kuin noin 550 °C. Rakenteiden suunnittelua pitkäaikaisiin alhaisiin lämpötiloihin tai pitkäaikaisiin korkeisiin lämpötiloihin ei tässä käsikirjassa käsitellä. Todetaan, että em. sovellutuksissa muilla kuin luvussa 3 esitetyillä mekaanisilla ominaisuuksilla ja korroosio-ominaisuuksilla on suurempi merkitys. Erityisesti tulenkestävät ja kuumalujat ruostumattomat teräkset (ei käsitellä tässä käsikirjassa) soveltuvat useimmissa tapauksissa paremmin korkeisiin lämpötiloihin ja suosituksena on lisätiedon hankinta käytännön tapauksissa.

Duplex-teräksiä ei tule käyttää sovellutuksissa, joissa teräs on pitkäaikaisesti yli n. 250 - 300 °C:n lämpötilassa johtuen haurastumisen mahdollisuudesta.

Luvussa 8 käsitellään paloteknistä mitoitusta ja esitetään mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa.

2.6 Sinkitys ja kontakti sulaan sinkkiin

Ruostumattomasta teräksestä valmistettuja kokoonpanoja ei saa sinkitä, koska sula sinkki voi aiheuttaa ruostumattoman teräksen haurastumista. Tulipalotilanteita varten varotoimenpiteitä voi harkita, jotta sinkityn teräksen sula sinkki ei putoa tai valu ruostumattoman teräksen pinnalle ja aiheuta haurastumista. Tämän lisäksi, riski haurastumiseen on sinkittävissä kokoonpanoissa, joissa ruostumaton teräs on liitetty hiiliteräkseen.

2.7 Eri tuotemuotojen saatavuus

2.7.1 Yleiset tuotemuodot

Tässä käsikirjassa käsitellyistä ruostumattomista teräksistä tehtyjä levyjä ja tankoja on yleisesti saatavilla. Ferriittisiä teräslajeja on yleisesti saatavilla aineenpaksuuteen 4 mm asti.

Austeniittisina teräslajeina rakenneputkia on hyvin saatavilla, samoin duplex teräslajeina 1.4462 ja 1.4162 sekä teräslajeina 1.4003 ja 1.4016. Kylmämuovattuja (rullamuovaamalla valmistettuja) rakenneputkia käytetään useissa rakenteellisissa sovelluksissa, mutta myös kuumamuovattuja tuotteita on saatavilla. Suorakulmaisia rakenneputkia voidaan valmistaa myös hitsaamalla kaksi särmäämällä valmistettua profiilia yhteen.

Avoprofiilit valmistetaan usein kylmämuovaamalla, hitsaamalla (kaari- tai laserhitsaus) tai pursottamalla. L-, U-, I- ja T-profiileja on saatavilla samalla dimensioalueella kuin vastaavia hiiliteräsprofiileja (esim. IPE, IPN, jne.); pienemmät dimensiot ovat kuumavalssattuja ja suuremmat dimensiot hitsattuja. Näitä profiileita on saatavilla austeniittisina teräslajeina 1.4301 ja 1.4401; duplex teräslajeina vaativat erityistilauksen. Kuumavalssatut profiilit ovat saatavina ainoastaan teräslajeina 1.4301 ja 1.4401.

Standardin mukaiset profiilikoot rakenneputkille ja avoprofiileille on annettu on-line suunnitteluohjelmassa sekä saatavilla on mobiililaitteille soveltuva apps (saatavilla www.steel-stainless.org/designmanual).

Kylmämuokatussa tilassa olevia ruostumattomia teräksiä on saatavissa eri tuotemuodoissa mukaan lukien levyt, arkit, rullat, nauhat, pyöröteräkset ja rakenneputket:

- levyt, arkit, rullat, nauhat (tyypilliset aineenpaksuudet ≤ 6.0 mm)
- pyöröteräkset (halkaisijat 5 mm - 60 mm)
- neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket (poikkileikkauksen mitat 400 mm asti, aineenpaksuus 1,2 mm - 12 mm).

2.7.2 Kylmämuovaus

On tärkeää, että rakenteiden valmistajan kanssa käydään riittävän aikaisessa vaiheessa keskustelut sen varmistamiseksi, että suuremman materiaalinpaksuuden rakenneosat (kokoonpanot) voidaan valmistaa. Ruostumattoman kylmämuovatun profiilin valmistus vaatii suurempia voimia kuin vastaavan profiilin valmistus hiiliteräksestä ja sen lisäksi ruostumattoman teräksen takaisinjousto on erilainen. Koneen koko rajoittaa kylmämuovatun profiilin pituutta särmättäessä ja käytettävissä oleva voima rajoittaa paksumpien profiilien tai vahvemmasta materiaalista tehtävien profiilien kokoa. Duplex-teräs vaatii likipitäen kaksinkertaisen voiman kuin austeniittiset teräkset ja sen takia profiilin mahdollinen koko voi olla vielä rajoitetumpi. Duplex terästen korkeampi lujuus edesauttaa niiden käyttöä ohuempina seinämänvahvuuksina. Lisäksi duplex terästen pienemmästä sitkeydestä johtuen, tulee käyttää suurempia taivutussäteitä. Ohutseinämäiset rakenneputket valmistetaan usein rullamuovaamalla ja hitsaamalla. Kuumavalssattu austeniittinen levy paksuuteen 13 mm asti voidaan kylmämuovata rakenteelliseksi profiiliksi, kuten L-profiiliksi. Kohdassa 11.5.2 esitetään lisätietoja.

2.7.3 Kuumavalssaus

Ruostumattomat teräslevyt, jotka ovat liian paksuseinämäisiä kylmämuovaukseen, kuumennetaan ja muovataan lopulliseen muotoonsa. Tämä menetelmä on yleensä kustannustehokkain, kun valmistusmäärä on suuri. L- ja U-profiilit yleisesti valmistetaan kuumavalssaamalla. Tähän menetelmään voidaan lisätä hitsaus valmistettaessa muita rakenteellisia profiileja. Esimerkiksi, hitsaamalla kaksi U-profiilia valmistetaan I-muotoinen profiili. Paksuseinämäiset rakenneputket valmistetaan usein kuumamuovaamalla ja hitsaamalla.

2.7.4 Pursotus

Kuumamuovaamalla pursotettujen ruostumattomien profiilien aihiona käytetään tankoa. Mikäli vaadittu poikkileikkauksen muoto ei ole yleisesti käytössä, tuotannon aloittamiseksi valmistusmäärä tulisi olla riittävän suuri työkalukustannusten kattamiseksi. Valmistettavan poikkileikkauksen suurin koko vaihtelee valmistajakohtaisesti mutta poikkileikkauksen tulee mahtua halkaisijaltaan 330 mm ympyrän sisään. Profiilit toimitetaan yleensä määrämittaisina aina pituuteen 10 m asti. Vakiomittaisten muotojen lisäksi pursottamalla valmistetaan suuri määrä asiakaskohtaisia poikkileikkausmuotoja, jotka muilla valmistusmenetelmillä edellyttäisivät koneistamista tai hitsaamista. Profiilien toimittajiin on tarvittaessa oltava yhteydessä profiilien minimi seinämän paksuuden ja nurkkapyöristyssäteiden osalta.

2.7.5 Levystä hitsaus

Levystä hitsaamalla valmistetaan tyypillisesti pieniä määriä asiakaskohtaisia muotoja, terävämpiä taitteita tai U-profiileja, joiden levykentät ovat tasapaksuja, tai profiileja, jotka ovat hyvin suuria. Kun projektissa edellytetään pieniä määriä hyvin suuria tai epätavallisen muotoisia profiileja, näiden valmistuksesta kokemuksen hankkinut konepaja usein valmistaa ne hitsaamalla levyistä.

Laser- tai kaarihitsaamalla valmistettuja yleisimpiä mittoja L-, I-, U- ja T- profiileista sekä rakenneputkista on enenevässä määrin palvelukeskusten varastomateriaalina. Austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä valmistettuja L-, I- ja U-profiileja on saatavilla profiilin korkeuteen 400 mm asti. Myös suurempia profiileja ja duplex teräsprofiileja voidaan valmistaa.

2.7.6 Pinnan viimeistely

Useissa käyttösovelluksissa pinnan viimeistelyn ja ulkonäön yhtenäisyys on tärkeää korroosiokäyttäytymisen, esteettisyyden ja huollettavuuden kannalta. Standardeissa EN 10088-4 ja -5 esitetään pinnan viimeistelyn luokitus, mattamaisesta tehdaspinnasta hiottuihin kirkkaisiin pintoihin. Jokaiselle pintaluokalle on oma merkintänsä numero-kirjan yhdistelmänä (1 kuumavalssatuille ja 2 kylmävalssatuille). Paksuseinämäiset avoprofiilit valmistetaan yleensä 1D pinnalla (kuumavalssattu, lämpökäsitelty ja peitattu[1]). Arkkitehtonisiin sovelluksiin valitaan usein kylmävalssattuja pintoja, jotka ovat pinnaltaan sileämpiä kuin kuumavalssatut pinnat, esimerkiksi 2B pinta (kylmävalssattu, lämpökäsitelty, peitattu ja viimeistelyvalssattu) on vakio kustannustehokas tehdaspinta. Myös muita erityisesti suunniteltuja pinnan viimeistelyjä yhtenäisen ulkonäön saavuttamiseksi arkkitehtonisissa sovelluksissa on saatavilla. Pinnan viimeistelyn osalta valmistajien välillä ja valmistajan omissa prosesseissa saattaa olla hieman eroavaisuutta, josta syystä toimijoiden tulee olla tietoisia pintojen yhteensopivuuden vaatimuksista. Siksi on suositeltavaa, että tilaaja ja toimittaja sopivat pinnan laadun vertailukappaleella. Kiiltävissä pinnoissa kaikki epätasaisuudet erottuvat selkeästi. Mattamaiset pinnat näyttävät aina tasaisemmilta. Eri ruostumattomilla terästyypeillä (austeniittinen, duplex, ferriittinen) on oma luontainen luonnollisen hopean värin vivahde, jonka vaihtelu pitäisi suunnittelussa ottaa huomioon.

2.7.7 Ruuvit

EN ISO 3506 mukaisia austeniittisia lujuusluokan 70 ruuveja on hyvin saatavilla. Tietyille halkaisijan ja pituuden rajoituksille viitataan standardiin EN ISO 3506. Tarvittaessa on erikoistilauksesta saatavissa erikoiskokoja, joiden teettäminen saattaa toisinaan olla taloudellista.

Ruuveja voidaan valmistaa useilla tekniikoilla, esim. koneistamalla (lastuava työstö), kylmämuovaamalla ja takomalla. Valssaamalla valmistetut kierteet ovat vahvemmat kuin koneistamalla valmistetut kierteet koska myötölujittumista tapahtuu valssauksen vaikutuksesta. Valssatun kierteen pintaan syntyy puristusjännitys joka parantaa väsymiskorroosion kestävyyttä ja joissain tapauksissa jännityskorroosionkestävyyttä (SCC). Valssatuilla kierteillä on myös parempi kierteiden kitkasyöpymiskestävyys. Kierteiden valmistaminen valssaamalla on yleisin valmistusmenetelmä ruuveille ja ohutlevyruuveille, erityisesti kun valmistetaan suuria määriä tavanomaisia ruuvikokoja. Suurempi halkaisijaisten

---

[1] Peittaamalla poistetaan hyvin ohut pintakerros metallia ruostumattoman teräksen pinnasta yleensä käyttämällä typpihapon ja fluorivetyhapon seosta. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vähemmän aggressiivisia aineita, joita on saatavilla peittaushappoihin erikoistuneilta toimittajilta.

ruuvien (noin M36 ja suuremmat) ja erityisesti lujempien duplex ruuvien kierteet on todennäköisimmin valmistettu leikkaamalla.

2.8 Elinkaarikustannukset ja ympäristövaikutukset

Materiaaleja valittaessa pitää kiinnittää entistä enemmän huomiota koko elinkaaren aikaisiin kustannuksiin eikä vain materiaalien hankintakustannuksiin Kokemukset osoittavat, että käyttämällä korroosiota kestävää materiaalia voidaan vähentää käytönaikaista kunnossapitoa, seisokkiaikoja sekä rakenneosien vaihtamista, jolloin tämä saattaa olla kustannustehokas ratkaisu vaikkakin materiaalikustannus alkuinvestoinnissa olisi korkeampi. Elinkaarikustannuksissa otetaan huomioon seuraavat asiat:

- hankintakustannukset,
- ylläpitokustannukset,
- jätteen ohjautuminen kaatopaikan sijasta kierrätykseen
- käyttöikä ja ympäristöt.

Ruostumattoman teräksen hankintahinta on huomattavasti korkeampi kuin hiiliteräksen, kuitenkin jonkin verran riippuvainen ruostumattomasta teräslajista. Ruostumattoman teräksen käytöllä voi syntyä säästöjä koska korroosiosuojapinnoitteita ei tarvita. Hyödyntämällä korkealujuuksisia ruostumattomia teräksiä voidaan valita dimensioiltaan pienempiä profiileja ja siten pienentää koko rakenteen painoa ja myös hankintakustannuksia. Lisäksi vältetään tarve korroosiosta johtuville pinnoitteiden huoltotoimenpiteille sekä rakenneosien vaihtamiselle, joka voi johtaa merkittävään ylläpitokustannusten säästöön pitkällä aikavälillä.

Ruostumattomien terästen erinomainen korroosionkestävys mahdollistaa harvemmat tarkastusten välit ja siten matalammat tarkastuskustannukset, matalammat ylläpitokustannukset sekä pitkän käyttöiän.

Ruostumattomalla teräksellä on korkea jäännösarvo (ts. arvo rakenteen eliniän päättyessä), vaikkakin tämä on harvoin määräävä tekijä rakenteille, joilla on pitkä suunniteltu käyttöikä (esim. yli 50 vuotta). Koska jäännösarvo on korkea, romu erotellaan kaatopaikkajätteestä ja kierrätetään uuden metallin valmistukseen. Teräksillä rakenteen purkuvaiheen (EOL) kierrätysaste on hyvin korkea. Ruostumattoman teräksen valmistajat käyttävät romua niin paljon kuin sitä on saatavilla, mutta materiaalin keskimääräinen 20-30 vuoden käyttöikä asettaa rajoituksen romumateriaalin saatavuudelle. Tyypillisesti ruostumattomasta teräksestä vähintään 60 % on kierrätysterästä. Ruostumaton teräs on 100 %:sti kierrätettävää ja sitä voidaan rajattomasti kierrättää uusiin korkealaatuisiin ruostumattomiin teräksiin.

Elinkaarikustannuslaskelmissa käytetään tavanomaisia periaatteita, joissa elinkaarikustannukset muunnetaan nykyarvoksi. Laskelmissa otetaan huomioon inflaatio, korko, verot ja mahdolliset riskitekijät. Tällöin voidaan tehdä vertailuja objektiivisesti eri vaihtoehtojen välillä ja ruostumattoman teräksen käytöstä aiheutuvia mahdollisia pitkäaikaisetuja voidaan verrata muihin materiaalivalintoihin.

3 Pitkäaikaiskestävyys ja materiaalin valinta

3.1 Yleistä

Ruostumattomat teräkset ovat yleensä hyvin korroosionkestäviä ja riittäviä useimpiin ympäristöihin. Tietyn ruostumattoman teräksen korroosionkestävyys riippuu sen sisältämistä seosaineista, mikä tarkoittaa, että jokaisella ruostumattomalla teräslajilla on hieman erilainen korroosionkestävyys. Ruostumattoman teräksen laji tulee siten valita huolella käyttökohteen mukaan. Mitä parempaa korroosionkestävyyttä vaaditaan, sitä suurempia ovat yleensä materiaalikustannukset. Esimerkiksi teräslaji 1.4401 on kalliimpi kuin teräslaji 1.4301 molybdeeniseostuksen takia. Valitsemalla duplex ruostumattoman teräksen on mahdollista saada paremmin korroosiota kestävä materiaali pienellä hintalisällä. Edelleen niiden korkeampi lujuus mahdollistaa profiilin mittojen pienentämisen ja siten myös pienemmän materiaalikustannuksen.

Kylmämuovatussa tilassa olevien austeniittisten teräslajien korroosionkestävyys on samankaltainen kuin hehkutetussa tilassa olevilla materiaaleilla.

Merkittävimmät syyt materiaalivalinnan epäonnistumiseen korroosionkestävyyden kannalta katsoen ovat:

(a) ympäristöolosuhteiden väärä arviointi tai teräs joutuu odottamattomiin olosuhteisiin, esim. kloridi-ionin odottamaton esiintyminen;

(b) ruostumattomalle teräkselle soveltumattoman valmistusmenetelmän käyttö (esim. hitsaus, lämpökäsittely ja kuumentaminen muovauksen aikana), puutteellinen hitsausoksidien poisto, tai pinnan vierasruoste voivat lisätä altistumista korroosiolle.

(c) liian karhea pinnanviimeistely tai poikkeavaan suuntaan asennettu pintakuvioitu (harjattu/hiottu) levy.

Vaikka pinnan tahraantumista tai korroosiota tapahtuu, on epätodennäköistä, että rakenteellinen eheys tästä syystä vaarantuisi. Toisaalta käyttäjät saattavat pitää pintojen hienoisia ruostetahroja vaurioina. Huolellinen materiaalin valinta, hyvä yksityiskohtien suunnittelu ja työsuoritus voivat merkittävästi pienentää tahraantumisen ja korroosion todennäköisyyttä. Käytännön ohjeita esitetään luvussa 11. Kokemus osoittaa, että mahdolliset vakavat korroosio-ongelmat todennäköisesti ilmaantuvat ensimmäisten 2 - 3 käyttövuoden aikana.

Tietyissä aggressiivisissa ympäristöissä eräät ruostumattomat teräslajit ovat alttiit paikallisille vauriomahdollisuuksille. Jäljempänä esitetään kuusi korroosiomekanismia, joista kolme viimeksi mainittua esiintyy erittäin harvoin, lähinnä rannikolla olevissa rakennuksissa.

Tulee huomata, että kosteuden läsnäolo (mukaan lukien kondensoitumisesta aiheutuva kostuminen) on välttämätön ehto korroosion esiintymiselle.

3.2 Korroosiomuodot ja eri teräslajien käyttäytyminen

3.2.1 Pistekorroosio (pitting corrosion)

Nimensä mukaisesti pistekorroosio esiintyy paikallisesti, pistemäisesti. Pistekorroosio syntyy passiivikerroksen paikallisena vahingoittumisena, joka yleensä aiheutuu kloridi-ioneista. Myös muilla haloideilla ja muilla anioneilla voi olla vastaava vaikutus. Pistekorroosion kehittyessä korroosiotuotteet voivat aiheuttaa hyvin voimakasta korroosiota syntyneessä särössä, joka usein johtaa nopeaan korroosion etenemiseen. Useimmissa rakenneteknisissä sovellutuksissa pistekorroosio rajoittuu todennäköisesti vain pintaan ja rakenneosan poikkileikkauksen pieneneminen voidaan jättää huomioon ottamatta. Korroosiotuotteet voivat kuitenkin tahria arkkitehtonista ilmettä. Lievää pistekorroosiota voidaan pitää hyväksyttävänä sellaisissa huoltorakenteissa kuten kanavat, putket ja muut vastaavat, mikäli vuotojen mahdollisuus otetaan huomioon.

Koska kloridi-ionit ovat pistekorroosion tärkein aiheuttaja ulkotiloissa, ovat rannikkoympäristöt ja maantiesuolan vaikutuksille alttiit ympäristöt melko aggressiivisia. Todennäköisyys, että pistekorroosiota tapahtuu tietyssä ympäristössä, riippuu kloridipitoisuuden lisäksi mm. seuraavista tekijöistä lämpötila, korroosiota aiheuttavat saasteet ja pienhiukkaset, happamuus, alkalisuus ja oksidoivien aineiden pitoisuus ja myös ympäristön happipitoisuus. Ruostumattoman teräksen kestävyys pistekorroosiota vastaan riippuu teräksen kemiallisesta koostumuksesta. Kromi, molybdeeni ja typpi parantavat kestävyyttä pistekorroosiota vastaan.

Pistekorroosioindeksi (Pitting Index) tai pistekorroosiokestävyyden ekvivalentti (PRE, Pitting Resistance Equivalent) on likimääräinen empiirinen mitta pistekorroosiokestävyydelle. PRE määritellään seuraavasti:

PRE = % wt Cr + 3,3(% wt Mo) + 16(% wt N)

Ruostumattoman teräksen PRE-arvo on hyödyllinen apusuure verrattaessa ruostumattomien terästen korroosionkestävyyttä toisiinsa ja sitä käytetään ainoastaan arviona. Pienet erot PRE-arvoissa materiaalien kesken voidaan kompensoida muillakin pistekorroosiokestävyyteen vaikuttavilla tekijöillä. Tästä syystä PRE-arvoa ei tulisi pitää ainoana vaikuttava tekijänä valinnassa.

Tässä käsikirjassa käsitellyistä ruostumattomista teräksistä teräslajilla 1.4301 on alhaisin PRE-arvo. Teräslajilla 1.4301 esiintyy pintakorroosiota matalan ja keskimääräisen korroosiorasituksen rannikkoalueille ja maantiesuolan vaikutusalueille sijoitetuilla rakenteilla sekä teräslajia 1.4301 ei ole suotavaa sijoittaa edellisiin ympäristöihin, joissa se altistu sumulle, roiskeille ja upotusrasitukseen. Teräslajilla 1.4301 voi myös ilmetä ei-hyväksyttävää pistekorroosiota vaikeissa teollisuusilmastoissa.

Austeniittista terästä 1.4401 tai duplex teräksiä 1.4362 ja 1.4162 suositellaan lievän tai kohtalaisen teollisuussaasteen altistamiin ympäristöihin sekä rannikkoalueille ja maantiesuolan vaikutusalueille. Kun saasteet ja suola-altistus ovat voimakkaampaa, duplex teräs 1.4462 tai jopa vielä paremmin korroosiota kestävä ruostumaton teräs voidaan valita.

3.2.2 Rakokorroosio (Crevice corrosion)

Rakokorroosio tapahtuu ahtaissa, tiivisteettömissä raoissa, joissa ohut vesikerros ulottuu raon ulkopuolelta rakoon. Raon tulee olla riittävän leveä, jotta vesi ja liuennut kloridi kulkeutuvat rakoon kuitenkin estäen hapen pääsyn.

Rakokorroosio voidaan välttää sulkemalla rako tiivisteellä tai eliminoimalla rakojen muodostuminen. Raon kriittisyys on riippuvainen sen geometriasta: kapeampi ja syvempi rako on kriittisempi korroosiolle.

Liitokset, jotka eivät ole täysin upotettuina veteen, tulee suunnitella siten, että kosteus johdetaan niistä poispäin. Osa ruostumattomista teräslajeista, mukaan lukien 1.4301 ja 1.4401, ovat alttiita rakokorroosiolle, kun ympäristössä on klorideja tai suoloja. Paremmin korroosiota kestävät austeniittiset ja duplex teräslajit eivät ole niin alttiita rakokorroosiolle ja niiden käyttäytyminen riippuu ympäristön olosuhteesta, erityisesti lämpötilasta.

Korroosio veteen upotuksissa olevissa raoissa on yleensä vakavampi kuin pinnan yläpuolella atmosfäärisessä olosuhteessa, jossa on kostumis- ja kuivumisjaksoja, tai raoissa, joissa on säännöllisesti kosteutta. Vedenalaiset ahtaat raot ovat aggressiivisimpia, koska niissä hapen diffuusio passiivikalvon ylläpitämiseksi on rajoitettu

Rakoja voi syntyä kahden metallin välisen liitoksen, tiivisteen, bioeliöstön, saostuman (pienhiukkaset, puiden lehdet, ruokajäämät, muut jätejäämät) ja pintavaurion kuten pintaan tarttuneen rautapartikkelin, takia. Kaikkia rakoja tulisi välttää, mutta usein niiden täydellinen välttäminen ei ole mahdollista

Kuten pistekorroosionkin tapauksessa kromi, molybdeeni ja typpi parantavat korroosion kestävyyttä ja rakokorroosion kestävyys kasvaa teräslajista 1.4301 teräslajeihin 1.4401 ja 1.4462 mentäessä.

3.2.3 Metalliparikorroosio (galvaaninen korroosio) (Bimetallic (galvanic) corrosion)

Kun kaksi erilaista metallia on suorassa kosketuksessa ja niitä samalla yhdistää elektrolyytti (esim. sähköä johtava neste kuten merivesi tai epäpuhdas muu vesi) syntyy sähkövirta anodimetallista katodimetalliin (jalompaan metalliin) elektrolyytin välityksillä. Seurauksena on, että epäjalompi metalli syöpyy.

Ruostumaton teräs tavallisesti muodostuu katodiksi galvaanisessa parissa ja siksi se ei kärsi galvaanisesta korroosiosta. Ruostumattomat teräkset ja kupariseokset ovat galvaanisessa sarjassa hyvin lähellä toisiaan ja ne voidaan yleensä asentaa suoraan kontaktiin kohtalaisissa ilmasto-olosuhteissa.

Tämä korroosiomuoto tulee erityisesti kyseeseen, kun ruostumaton teräs liitetään hiiliteräkseen tai vain vähän seostettuihin teräksiin, ilmastorasitusta kestäviin teräksiin tai alumiiniin. On tärkeää, että hitsauslisäaine on vähintään yhtä jaloa kuin perusaine (tavallisesti ruostumaton teräs). Niin ikään käytettäessä kiinnittimiä, ruuvien materiaalin tulee korroosionkestävyydeltään olla vastaava kuin korroosionkestävin liitettävä materiaali. Metalliparikorroosiota tapahtuu hyvin harvoin eri ruostumattomien teräslajien välillä ja mikäli näin tapahtuu niin, edellytyksenä on täysin upotusrasituksessa olevat materiaalit.

Metalliparikorroosion välttämisen periaate on estää sähkövirran syntyminen seuraavasti:

- eristämällä erilaiset metallit toisistaan, esim. katkaisemalla metallinen kosketus, ks. 7.1.1).
- estämällä elektrolyyttisen kosketuksen syntyminen, esim. katkaisemalla elektrolyyttinen kosketus maalilla tai muulla pinnoitteella. Tätä menetelmää käytettäessä ja kun molempien metallien pinnoittaminen on epäkäytännöllistä, on

suositeltavaa jalomman metallin pinnoittaminen (ts. ruostumattoman teräksen pinnoittaminen, jos ruostumaton teräs ja hiiliteräs ovat kosketuksissa toisiinsa).

Voimakkaan korroosion vaara on suurimmillaan, jos jalomman metallin pinta-ala (so. ruostumaton teräs) on suuri verrattuna vähemmän jalon metallin (so. hiiliteräs tai alumiini) pinta-alaan. Erityistä huomiota tulee kiinnittää maalien tai muiden pinnoitteiden käyttämiseen hiiliteräksen pinnalla. Jos pinnoitteessa on pieniä huokosia tai reikiä, pieni pelkän hiiliteräksen alue aiheuttaa hyvin suuren katodi/anodi pinta-alojen suhteen ja seurauksena voi olla vakava pistekorroosio hiiliteräksessä. Näissä tapauksissa on suositeltavaa ulottaa hiiliteräksen korroosiomaalisuojaus myös ruostumattomaan teräkseen vähintään 75 mm:n alueelle metallien kontaktipinnasta, jolloin huokoset johtavat pienempään katodi/anodi pinta-alojen suhteeseen.

Tyypillisesti vaarallisia katodi/anodi-pinta-alojen suhteita esiintyy kiinnittimien yhteydessä ja liitoksissa. Ruostumattomien terästen kiinnityksissä tulee välttää hiiliteräksestä tehtyjä ruuveja, koska ruostumattoman teräksen pinta-alan suhde hiiliteräksestä tehtyjen ruuvien pinta-alaan on suuri ja ruuvit ovat siten alttiin korroosiolle. Vastaavasti käytettäessä ruostumattomasta teräksestä tehtyjä ruuveja hiiliteräksen kiinnityksissä vastaava pinta-ala on pieni ja korroosiovaara siten huomattavasti pienempi. Yleensä on järkevää hyödyntää aikaisempaa kokemusta vastaavista olosuhteista, koska erilaiset metallit voidaan usein yhdistää olosuhteissa, joissa satunnaisesti esiintyy kondensoitumista tai kostumista, joka ei kuitenkaan ole haitallista erityisesti, jos elektrolyytin sähkönjohtavuus on pieni.

Edellisten vaikutusta on vaikea ennustaa, koska korroosionopeus määräytyy usean muuttujan vaikutuksesta. Sähkökemiallisen jännitesarjan käytön yhteydessä ei huomioida pinnan oksidikalvoja eikä pinta-ala-suhteen vaikutusta eikä myöskään eri elektrolyyttien kemiallista koostumusta. Siksi puutteellinen lähtötietojen tuntemus näiden taulukoiden käytössä voi johtaa vääriin johtopäätöksiin. Taulukoita tulisi käyttää erityistä huolellisuutta noudattaen ja ainoastaan alustavaan arviointiin.

Metallien yleinen käyttäytyminen kosketuksessa muiden metallien kanssa maaseutu-, kaupunki-, teollisuus- ja rannikko-olosuhteissa esitetään julkaisussa: BS PD 6484 *Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation*.

3.2.4 Jännityskorroosio (Stress corrosion cracking, SCC)

Jännityskorroosio edellyttää vetojännityksen ja erityisten ympäristötekijöiden samanaikaista vaikuttamista, joiden esiintyminen tavallisissa rakennusten ilmasto-olosuhteissa on epätodennäköistä. Vaikuttavan jännityksen ei tarvitse olla kovin suuri suhteessa 0,2-rajaan. Jännitys voi aiheutua kuormituksesta tai se voi olla valmistusprosessista (kuten hitsaus tai taivutus) aiheutuva jäännösjännitys Ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät ole herkkiä jännityskorroosiolle (SCC). Ruostumattomilla duplex-teräksillä on erittäin hyvä jännityskorroosionkestävyys tässä käsikirjassa käsiteltyihin austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna. Jännityskorroosio-olosuhteisiin on kehitetty korkeasti seostettuja austeniittisia ruostumattomia teräksiä, kuten 1.4539, 1.4529, 1.4547 ja 1.4565.

Tulee noudattaa varovaisuutta, mikäli isot alkujännitykset (esim. kylmämuokkauksesta aiheutuvat alkujännitykset) omaavaa ruostumatonta terästä käytetään korkean kloridipitoisuuden (esim. sisällä olevat uima-altaat, meri- ja offshore-ympäristö) omaavissa olosuhteissa. Suurilla kuormilla kuormitetut köydet klorideja sisältävässä ympäristössä voivat olla herkkiä jännityskoorroosiolle (SCC) riippuen käytetystä ruostumattomasta teräslajista.

Kohdassa 3.5.3 esitetään ohjeita ruostumattoman teräslajin valitsemiseksi uimahalliympäristöön, joilla vältetään jännityskorroosioriski.

3.2.5 Yleinen (tasainen) korroosio (General (uniform) corrosion)

Tavallisissa olosuhteissa, jotka ovat tyypillisiä rakenteellisissa sovellutuksissa, ruostumattomassa teräksessä ei tapahdu yleistä poikkileikkauksen pienenemistä ruostumalla, joka on tyypillistä seostamattomille (yleiset rakenneteräkset) teräksille.

3.2.6 Raerajakorroosio ja hitsauskorroosio (Intergranular corrosion (sensitisation) and weld decay)

Kun austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat pitkän ajan 450 - 850 °C:en lämpötilassa, teräksen hiili diffuntoituu raerajoille ja muodostuu kromikarbidierkaumia. Tämä siirtää kromia kiinteästä liuoksesta ja johtaa pienempään kromipitoisuuteen raerajojen läheisyydessä. Tässä tilassa olevia teräksiä kutsutaan *herkistyneiksi.* Raerajat tulevat alttiiksi valikoivalle korroosiolle syövyttävässä ympäristössä. Ilmiötä kutsutaan *hitsauskorroosioksi,* kun se esiintyy hitsin lämpövaikutusalueella.

Raerajakorroosion estämiseksi on olemassa kolme tapaa:

- käytetään teräksiä, joiden hiilipitoisuus on pieni;
- käytetään titaanilla tai niobilla stabiloitua terästä (esimerkiksi 1.4541, 1.4571, 1.4509, 1.4521 tai 1.4621), koska nämä aineet ensisijassa muodostavat hiilen kanssa stabiileja yhdisteitä ja siten pienentävät kromikarbidien muodostumisriskiä;
- käytetään lämpökäsittelyä, joka on kuitenkin harvinainen käytännössä.

Valittaessa austeniittisia ja duplex ruostumattomia teräksiä hitsattaviin sovelluksiin, pitäisi spesifioida matalahiilisiä (enintään 0,03 %) teräslajeja, jotta vältetään herkistyminen ja raerajakorroosio. Raerajakorroosio on nykyään hyvin harvinainen austeniittisilla ja duplex teräslajeillakin, koska nykyaikaiset teräksen valmistusmenetelmät mahdollistavat matalan hiilipitoisuuden ja siten ongelma vältetään.

Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat enemmän alttiita hitsauksen aiheuttamalle herkistymiselle kuin austeniittiset ruostumattomat teräkset. Siksi niitä hitsattaessa, vaikkakin teräslaji olisi matalahiilinen, on edelleen tärkeää käyttää stabiloituja ferriittisiä teräslajeja.

3.3 Korroosio eri ympäristöissä

3.3.1 Ilma

Ilmastolliset olosuhteet vaihtelevat ja myös niiden vaikutus ruostumattomiin teräksiin vaihtelee. Maaseutuympäristöt, joita teollisuuden kaasut tai rannikon suolat eivät ole saastuttaneet, ovat hyvin mietoja korroosion kehittymisen kannalta, vaikka kosteus olisi suurikin. Teollisuus- ja satamaympäristöt ovat huomattavasti vakavampia korroosion kannalta. Kohdassa 3.5 esitetään ohjeita sopivan ruostumattoman teräksen valitsemiseksi eri olosuhteisiin.

Ilmastollisen korroosion yleisin syy on valmistusprosessista (joko konepajassa tai työmaalla) peräisin olevat metalliset rautapartikkelit ja mereltä, maantiesuolasta, teollisuussaasteista ja kemikaaleista (esimerkiksi valkaisuaineet ja suolahappo) peräisin olevat kloridit. Pinnalle tarttuneet partikkelit (pöly, hiekka ja kemikaalit), vaikka eivät reagoi (inerttejä), voivat muodostaa rakoja ja siten voivat absorboida suoloja, kemikaaleja ja heikkoja happoja happamista sateista. Koska ne kykenevät säilyttämään pinnan kosteana pidempään, tuloksena voi olla korroosiorasitukseltaan vaativampi paikallinen ympäristö.

Pinnan viimeistelyllä on merkittävä vaikutus altistuneen pinnan yleiseen ulkonäköön (esimerkiksi lian kerääntymiseen), sateen vaikutukselle pinnan puhdistamiseen ja korroosionopeuteen (sileällä pinnalla on parempi korroosion kestävyys).

3.3.2 Merivesi

Merivesi, suolainen vesi mukaan lukien, sisältää suuren määrän kloridia ja sen johdosta muodostaa korroosiorasituksen. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4401 voi tapahtua vakavaa pistekorroosiota. Nämä teräslajit voivat altistua myös korroosiovaikutukselle raoissa, jotka muodostuvat rakennedetaljeihin tai teräksen pintaan kiinnitarttuneeseen merieliöstöön kuten merirokot.

Sovelluksiin, joissa korroosiota voidaan hyväksyä, duplex 1.4462 voi olla soveltuva edellyttäen, että suunniteltu käyttöikä on määritetty ja rakenneosat tarkastetaan. Kun rakenteen suunnittelu käyttöikä on pitkä, teräslajiksi pitäisi valita super austeniittinen, super ferriittinen tai super duplex teräslaji. (Nämä teräslajit ovat seostettuja suuremmilla pitoisuuksilla kromia, nikkeliä, molybdeenia, kuparia ja typpeä.) Näiden terästen korroosionkestävys on riittävä merenalaisiin sovelluksiin ja kohteisiin, joissa käytetään väkeviä happoja. Tyypillisiä super austeniittisia teräslajeja ovat 1.4565, 1.4529 ja 1.4547 sekä tyypillisiä super duplex lajeja ovat 1.4410, 1.4501 ja 1.4507.

Säännöllinen suolavedelle ja roiskevedelle altistuminen voivat aiheuttaa samanlaisen vaikutuksen kuin upotus, koska kloridit voivat konsentroitua teräksen pinnalla veden haihtuessa. Myös jäänestossa käytettävien suolojen suuret kloridimäärät valumavesissä voivat aiheuttaa samanlaisen ongelman tulvivissa viemäröintiosissa.

Rankan metalliparikorroosion mahdollisuus tulee ottaa huomioon, jos ruostumatonta terästä käytetään merivedessä yhdessä muiden metallien kanssa.

3.3.3 Muut vedet

Austeniittisten ja duplex terästen vakiolajit soveltuvat hyvin tislatun veden, vesijohtoveden ja kuumavesisäiliöiden laitteisiin. Mikäli kuitenkin veden pH-arvo on vähemmän kuin 4, materiaalin valintaan pitäisi noudattaa asiantuntijan neuvoja.

Käsittelemättömät joki- tai järvivedet ja teollisuuden prosessivedet voivat joskus olla erittäin syövyttäviä. Tällaiselle vedelle tulisi selvittää sen täydellinen kemiallinen koostumus, pH-arvo, kiinteän aineen sisältö ja tyyppi sekä kloridipitoisuus. Myös tyypillinen käyttölämpötila-alue, biologisen ja mikrobiologisen toiminnan luonne, sekä korroosiota aiheuttavien kemikaalien konsentraatio ja luonne ovat olennaisia selvitettäviä. Mikäli vesi ei täytä juomakelpoisuus vaatimusta, materiaalin valintaan pitäisi noudattaa asiantuntijan neuvoja.

Eroosiokorroosion mahdollisuus tulee ottaa huomioon vesissä, jotka sisältävät hankaavia aineita.

3.3.4 Kemialliset ympäristöt

Ruostumattomat teräkset kestävät hyvin useita kemikaaleja, josta syystä niitä käytetäänkin näiden varastointiin. Ruostumattomien terästen käyttösovellutukset kemiallisissa ympäristöissä ovat laajat ja tässä ei ole tarkoituksenmukaista käsitellä tätä asiaa yksityiskohtaisesti. Kemialliset ympäristöt eivät sisälly standardin EN 1993-1-4 mukaiseen ohjeistukseen materiaalin valinnasta. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että monissa sovellutuksissa muut kuin tässä käsikirjassa käsiteltävät teräkset voivat olla soveltuvampia. Tällaisissa tapauksissa on syytä käyttää korroosioinsinöörin asiantuntemusta.

Valmistajien julkaisemia taulukoita, jotka esittävät korroosiotestien tuloksia eri kemikaaleissa tulee käyttää asiantuntemuksella. Vaikka taulukoissa esitetään yksittäisen teräksen korroosiokestävyys, käyttöolosuhteet (lämpötila, paine, pitoisuus, jne.) vaihtelevat ja ne yleensä poikkeavat koeolosuhteista. Myös epäpuhtauksilla ja ilmapitoisuudella voi olla huomattava vaikutus tuloksiin.

3.3.5 Maaperä

Maaperät eroavat toisistaan syövyttävyydeltään, joka on riippuvainen maaperän kosteudesta, pH-arvosta, ilmastuksesta, syövyttävien kemikaalien määrästä ja pinnan vedenpoistosta. Ruostumattomat teräkset soveltuvat yleensä hyvin erilaisiin maaperä-olosuhteisiin, joissa on korkea resistiivisyys. Matalan resistiivisyyden kosteissa maaperissä on havaittu pistekorroosiota. Aggressiivisten kemikaalien, kuten kloridi-ionien, ja bakteerien sekä hajavirtojen (jotka aiheutuvat tasavirtaa käyttävistä paikallista kuljetusjärjestelmistä kuten rautatie- ja raitiovaunujärjestelmistä) vaikutuksesta voi tapahtua paikallista korroosiota. Hajavirtojen kehittymistä voidaan ehkäistä eristämällä rakenneosa (pinnoittamalla tai kääreellä) ja/tai katodisella suojauksella.

Teräslajin valitsemiseksi suositellaan, että maaperään upotetun ruostumattoman teräksen korroosionkestävyyttä arvioidaan ensin ottaen huomioon maaperässä oleva kloridi-ionien määrä ja toiseksi maaperän resistiivisyys ja pH-arvo sekä olettaen huono vedenpoisto kaikissa tapauksissa. Taulukko 3.1 esitetään suosituksia soveltuviksi teräslajeiksi erilaisiin maaperä-olosuhteisiin.

Taulukko 3.1 *Ruostumattomat teräslajit erilaisiin maaperä-olosuhteisiin*

Tyypillinen sijainti	maaperäolosuhde	Ruostumaton teräslaji
Sisämaa	Cl < 500 ppm	1.4301, 1.4307 1.4401, 1.4404
	Resistiivisyys>1000 ohm.cm	
	pH > 4,5	
Kloridit (rannikko/jäänestonsuolat/ ei-vuorovesi-alue)	Cl < 1500 ppm	1.4401, 1.4404
	Resistiivisyys>1000 ohm.cm	
	pH > 4,5	
Kloridit (rannikko/jäänestonsuolat/ vuorovesi-alue)	Cl < 6000 ppm	1.4410, 1.4547, 1.4529
	Resistiivisyys>500 ohm.cm	
	pH > 4,5	
Huom.: 1.4410 on super duplex teräslaji sekä 1.4547 ja 1.4529 ovat super austeniittisia teräslajeja. Näitä teräslajeja ei yleensä käytetä rakentamisen sovelluksissa ja ne eivät ole tämän käsikirjan soveltamisalaa.		

3.4 Korroosioneston suunnittelu

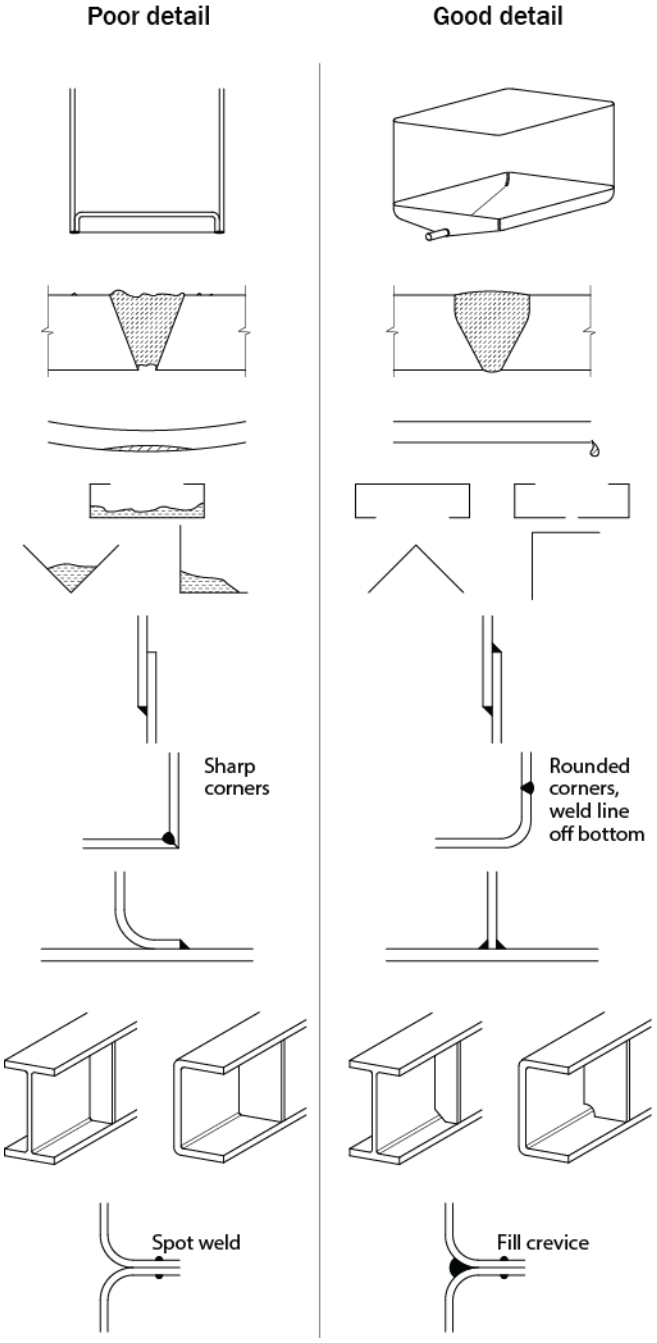
Tärkein asia korroosion estämiseksi on tarkoituksenmukaisen tarkasteltavaan ympäristöön sopivan ruostumattoman teräslajin ja siihen liittyvien valmistusmenetelmien valinta. Teräslajin määrittämisen jälkeen paljon on kuitenkin saavutettavissa huolellisella yksityiskohtien suunnittelulla teräksen hyvän korroosionkestävyyden saavuttamiseksi. Korroosiota ehkäisevät toimenpiteet tulee ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa.

Taulukossa 3.2 esitetään tarkistuslista. Kaikki tarkistuslistan kohdat eivät esitä rakenteellisessa mielessä parasta mahdollista yksityiskohtaa ja kaikkia kohtia ei ole tarkoitettu sovellettavaksi kaikissa ympäristöissä. Erityisesti vähän syövyttävissä

ympäristöissä tai milloin suoritetaan jatkuvaa rakenteen huoltoa, monet suosituksista eivät ole tarpeen. Kuvassa 3.1 esitetään huonoja ja hyviä yksityiskohtia korroosionkestävyyden kannalta.

Taulukko 3.2 *Tarkistuslista korroosioneston suunnitteluun*

Vältä lian, kosteuden ja korroosiota aiheuttavien saostumien kerääntymistä
• Suuntaa kulmateräs- ja U-profiilit siten, että lian ja kosteuden kerääntymisen todennäköisyys minimoituu. • Käytä kuivatusreikiä ja varmista, että ne ovat riittävän suuria lian kasaantumisen välttämiseksi. • Vältä vaakasuoria pintoja. • Käytä pientä kaltevuuskulmaa jäykisteissä, jotka yleensä ovat vaakatasossa. • Käytä putkia tai umpinaisia profiileja (putkien suojaus kuivalla kaasulla tai ilmalla tapauksissa, joissa vahingollinen kosteuden tiivistyminen on mahdollista). • Valitse sileä pinta, tai, mikäli karheampi pinta valitaan, niin asenna siten, että uurteet ovat vertikaalisuunnassa.
Vältä rakoja tai käytä tiivistettä
• Käytä mieluummin hitsauskiinnityksiä kuin ruuvikiinnityksiä.
• Käytä jatkuvia hitsejä tai kittiä.
• Käytä mieluummin hiottuja hitsejä.
• Vältä biologisesti syntyvää kasvustoa.
• Käytä inerttiä joustavaa aluslevyä tai hyvälaatuista tiivistysainetta ei-upotusrasituksessa oleville ruuvikiinnityksille.
Pienennä jännityskorroosiosäröjen syntymisen todennäköisyyttä niissä ympäristöissä, joissa jännityskorroosiosäröjä voi syntyä (ks. kohta 3.2.4):
• Minimoi valmistuksen aikana syntyvät jännitykset käyttämällä sopivaa hitsausjärjestystä. • kuulapuhalla pintaan puristusjännitys (mutta vältä käyttämästä rauta/teräs rakeita, jotta nämä partikkelit eivät uppoudu pintaan).
Pienennä pistekorroosion syntymisen todennäköisyyttä (ks. kohta11):
• Poista hitsausroiskeet. • Peittaa ruostumaton teräs poistaaksesi hitsauksen päästövärit. Voimakkaasti oksidoivia klorideja, jotka sisältävät saostuskemikaaleja kuten ferrikloridi, tulee välttää; mieluummin käytetään peittauskylpyä tai peittauspastaa, jotka molemmat sisältävät typpi- ja fluorivetyhappoa. Hitsit tulee aina puhdistaa korroosionkestävyyden säilyttämiseksi. Muita keinoja ovat mekaaninen puhdistaminen hiovalla aineella tai lasikuulapuhallus, tai paikallista elektrolyysiä voidaan myös käyttää hitsauksen päästövärien tai hitsien puhdistamiseen. • Vältä hiiliteräspartikkeleiden kerääntymistä (esim. käytä ruostumattomille teräksille tarkoitettuja valmistusalueita ja työkaluja). • Noudata sopivaa huolto-ohjelmaa.
Pienennä metalliparikorroosion todennäköisyyttä (ks. kohta 3.2.3):
• Eristä osat toisistaan sähköisen kosketuksen välttämiseksi. • Käytä tarkoituksenmukaisia maaleja. • Minimoi kosteana oloajat. • Käytä metalleja, jotka ovat lähellä toisiaan sähkökemiallisessa sarjassa.



Kuva 3.1 *Korroosion kannalta huonoja ja hyviä yksityiskohtia*

3.5 Materiaalin valinta

3.5.1 Yleistä

Korroosionkestävyys on tärkein hyödynnettävä ominaisuus, kun ruostumatonta terästä käytetään rakenteellisissa sovellutuksissa. Ko. ominaisuutta hyödynnetään esteettisistä syistä, huoltokustannusten minimoimiseksi tai pitkäikäisyyden aikaansaamiseksi. Korroosionkestävyys on siis päätekijä sopivaa teräslajia valittaessa.

.

Oikean ruostumattoman teräslajin valinnassa tulee ottaa huomioon ympäristöolosuhteet, valmistuksen vaatimukset kuten taivutussäde ja hitsaus, pinnanlaatu ja rakenteen huolto. Lisäksi suunnittelijan tulee määrittää arviointiperusteet korroosiovauriolle. Mikäli rakenteen tulee säilyä rakenteellisesti vahingoittumattomana tietyn määrätyn ajan ja ulkonäkö ei ole oleellinen, hyväksyttävä korroosionopeus otetaan huomioon materiaalin valinnassa ja siten huonommin korroosiota kestävä ruostumaton teräslaji saattaa olla riittävä. Jos tavoitteena kuitenkin on puhdas korroosiosta vapaa pinta, tämän saavuttamiseksi voidaan edellyttää paremmin korroosiota kestävä ruostumaton teräslaji, sileämpi pinnan viimeistely tai useammin suoritettava pinnan puhdistaminen. Huoltovaatimukset ovat minimaaliset; pelkästään teräksen peseminen ja luonnollinen sade (veden huuhteleva vaikutus) ylläpitävät tai jopa parantavat alkuperäistä ulkonäköä ja pidentävät merkittävästi käyttöikää.

Suunnittelun ensimmäinen tehtävä on kuvata ympäristöolosuhteet ja niiden odotettavissa oleva muuttuminen. Korroosiokäyttäytymisen arvioimiseksi syövyttävälle aineelle altistumisen lisäksi, käytön, ilmaston ja rakennedetaljien vaikutus otetaan huomioon samoinkuin suunniteltu käyttöikä. Esimerkiksi teollisuuden käyttökohteissa syövyttävien kemikaalien yhdistelmät ja väkevyydet, vaikutusaika, pinnalle kerääntyneet saostumat, happamuus sekä kunnossapito ja puhdistaminen kaikki vaikuttavat korroosiokäyttäytymiseen. Ulkotilojen käyttösovelluksissa otetaan huomioon voimakkaan puhdistavan sateen vaikutus (tai rakenteen suojauksen vaikutus), kosteus (esim. ilmankosteus, sateen voimakkuus, sumu), ilmassa olevat hiukkaset, suolasumu (esim. kallioinen rannikko tai moottoritie), roiskeet tai upottaminen kloridipitoiseen (meri)veteen ja muut vastaavanlaiset tekijät. Kaikissa sovelluksissa rakennedetaljit kuten tiivisteettömät raot, kontakti muihin metalleihin ja pinnan viimeistely voivat vaikuttaa korroosiokäyttäytymiseen Rakenteen käyttötarkoituksen mahdolliset tulevat muutokset tulee ottaa huomioon. On myös huomattava, että vaikka rakenteet tai laitteet sijaitsevat lähellä toisiaan voi niiden altistumistaso olla hyvin erilainen.

Teräslajeja valittaessa tulee ottaa huomioon, mitkä korroosiomuodot voivat olla merkittäviä ko. käyttöolosuhteissa. Tämän arvioiminen vaatii ruostumattomien terästen korroosiomekanismien tuntemusta. Huomiota tulee kiinnittää mekaanisiin ominaisuuksiin, valmistuksen helppouteen, tuotteiden saatavuuteen, pinnanlaatuun ja kustannuksiin.

3.5.2 Menettely austeniittisen ja duplex ruostumattoman teräslajin valitsemiseksi annetaan standardissa EN 1993-1-4

Standardissa EN 1993-1-4+A1:2015 esitetään ruostumattoman teräslajin valintamenettely kuormaa kantaviin sovelluksiin. Menettelyä sovelletaan rakenteellisiin teräsosiin. Betonissa ja muuratuissa rakenteissa käytettävien kiinnikkeiden materiaalin valinnan osalta viitataan standardeihin EN 1992 ja EN 1996. Menetelmässä ei oteta huomioon:

- teräslajin/tuotteen saatavuutta
- pinnan viimeistelyvaatimuksia, esimerkiksi arkkitehtoniset tai hygieeniset syyt
- liittämismenetelmiä

Menettely olettaa, että seuraavat kriteerit täytetään:

- käyttöympäristön pH-arvon tulee olla lähellä neutraalia (pH 4-10)

- rakenteelliset osat eivät ole kokonaan tai osittain altistettuna kemialliselle prosessille
- käyttöympäristö ei altista pysyvälle tai usein tapahtuvalle upotukselle meriveteen

Mikäli olosuhteet poikkeavat edellisistä, pyydetään asiantuntijan ohjeistusta.

Menettely soveltuu eurooppalaisille käyttöympäristöille. Menettelyä ei tule käyttää Euroopan ulkopuolisille alueille ja se voi olla erityisen harhaanjohtava maailman tietyille alueille kuten Keski-Itä, Kauko-Itä ja Keski-Amerikka.

Menettely sisältää seuraavat vaiheet:

- Ympäristön korroosionkestävyystekijän (CRF) määrittäminen (Taulukko 3.3);
- Korroosionkestävyysluokan (CRC, taulukko 3.4) määrittäminen korroosionkestävyystekijän (CRF) arvoa käyttäen.

Taulukko 3.5 esitetään teräslajit, joiden korroosionkestävyys on soveltuva tiettyyn käyttöympäristöön. Tietyn teräslajin valinta riippuu korroosionkestävyyden lisäksi muistakin tekijöistä, kuten lujuudesta ja vaaditun tuotemuodon saatavuudesta. Materiaalin erittely korroosionkestävyysluokan (CRC) ja suunnittelulujuuden osalta, esimerkiksi CRC II ja f_y = 450 N/mm^2, on riittävä, jotta materiaalin toimittaja voi suositella varsinaisen teräslajin vastaamaan korroosionkestävyysluokkaa.

Menettelyä sovelletaan kokoonpanoille, jotka altistuvat ympäristöolosuhteille ulkona. Kokoonpanoille, jotka altistuvat hallituille sisäympäristöolosuhteille, korroosionkestävyystekijä (CRF) on 1,0. Hallittuja sisäympäristöolosuhteita ovat ilmastoidut, lämmitetyt tai suljetut tilat. Monikerroksisia pysäköintihalleja, lastauslaitureita ja muita avoimia rakenteita käsitellään ulkoympäristöinä. Sisäuimahallit ovat sisätilojen erikoistapauksia (ks. kohta 3.5.3).

CRF on riippuvainen käyttöympäristön ankaruudesta ja se lasketaan seuraavasti:

$$\mathrm{CRF} = F_1 + F_2 + F_3$$

missä

F_1 = riski altistua suolaisesta vedestä tai jäänpoiston suoloista peräisin oleville klorideille;

F_2 = riski altistua rikkidioksideille;

F_3 = puhdistusmenetelmä tai altistuminen sateen puhdistusvaikutukselle.

Tekijän F_1 arvo rannikolla sijaitseville kohteille riippuu erityisesti sijainnista Euroopan alueella ja on johdettu kokemuksen perusteella olemassa olevien rakenteiden, korroosiotestausaineiston ja kloridien jakaumatiedon perusteella. Euroopassa vallitsevien ympäristöolosuhteiden suuri hajonta tarkoittaa, että joissain tapauksissa laskettu CRF arvo saattaa olla konservatiivinen.

Kansallisessa liitteessä voidaan esittää, mikäli alhaisempi korroosionkestävyystekijä (CRF) voidaan valita perustuen luotettavaan paikalliseen kokemukseen tai testausaineistoon, jotka tukevat esitettyä valintaa.

Rakenteen eri osilla voi olla erilainen altistusolosuhde, esimerkiksi yksi osa voi olla täysin altistettu ja toinen osa täysin katettu. Jokainen altistustapaus arvioidaan erikseen.

Menettelyssä oletetaan, että standardin EN 1090-2 vaatimuksia noudatetaan hitsausmenetelmille ja hitsien puhdistamiselle, ruostumattoman teräksen pintojen kontaminaation välttämiseksi tai poistamiseksi sekä termisen tai mekaanisen leikkaamisen jälkeen tehtävälle puhdistamiselle. Virheellinen työsuoritus edellä mainituissa työvaiheissa johtaa korroosionkestävyyden heikkenemiseen hitsatuissa osissa.

Taulukko 3.3 *Korroosionkestävyystekijän CRF määrittäminen*

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3$$

F_1 Riski altistua merivedestä tai jäänpoistosuoloista peräisin oleville klorideille		
HUOM. M on etäisyys mereen ja S on etäisyys maantiehen, johon käytetään jäänpoistosuolausta		
1	Hallitut sisäympäristöolosuhteet	
0	Matala riski altistumiseen	M > 10 km tai S > 0,1 km
-3	Keskimääräinen riski altistumiseen	1 km < M ≤ 10 km tai 0,01 km < S ≤ 0,1 km
-7	Korkea riski altistumiseen	0,25 km < M ≤ 1 km tai S ≤ 0,01 km
-10	Erittäin korkea riski altistumiseen	Maantietunnelit, joissa jäänpoistosuolausta käytetään tai kulkuneuvot voivat tuoda mukanaan jäänpoistosuolaa tunneliin
-10	Erittäin korkea riski altistumiseen	M ≤ 0,25 km
		Pohjanmeren rannikko Saksassa ja Baltian maiden rannikot
-15	Erittäin korkea riski altistumiseen	M ≤ 0,25 km
		Atlantin rannikko Portugalissa, Espanjassa ja Ranskassa. Englannin kanaalin ja Pohjanmeren rannikko Englannissa, Ranskassa, Belgiassa, Hollannissa ja Etelä-Ruotsissa. Kaikki muut rannikkoalueet Englannissa, Norjassa, Tanskassa ja Irlannissa. Välimeren rannikko
F_2 Riski altistua rikkidioksidille		
Huom. Euroopan rannikkoalueilla ympäristön rikkidioksidipitoisuus on yleensä matala. Sisämaan ympäristön rikkipitoisuus on joko alhainen tai keskimääräinen. Pitoisuuden luokitus korkeaksi on epätavallista ja liittyy alueille, joissa sijaitsee erityisen raskasta teollisuutta tai on erityinen ympäristöolosuhde kuten maantietunnelit. Rikkidioksidipitoisuus voidaan arvioida standardissa ISO 9225 esitetyn menetelmän mukaisesti.		
0	Matala riski altistumiseen	<10 µg/m³ keskimääräinen kaasun konsentraatio
-5	Keskimääräinen riski altistumiseen	10 - 90 µg/m³ keskimääräinen kaasun konsentraatio
-10	Korkea riski altistumiseen	90 - 250 µg/m³ keskimääräinen kaasun konsentraatio
F_3 Puhdistusväli tai altistuminen sateen puhdistusvaikutukselle (jos $F_1 + F_2 \geq 0$, niin F_3=0)		
0	Altistuu täysin sateen puhdistusvaatimukselle	
-2	Eritelty puhdistusmenetelmä	
-7	Ei sateen puhdistusvaikutusta tai ei ennalta määrättyä puhdistusväliä	
Huom. Jos rakenneosalle edellytetään säännöllinen korroosiotarkastus ja puhdistus, on tämä esitettävä käyttäjälle kirjallisesti. Tarkastus, puhdistusmenetelmä ja -taajuus määritellään. Mitä useammin puhdistus tehdään, sitä parempi hyöty saavutetaan. Puhdistusvälin tulisi olla vähintään 3 kuukautta. Jos puhdistus on määritelty, se on tehtävä kaikille rakenneosille, eikä vain niille, joihin on helppo päästä tai ovat hyvin näkösällä.		

Taulukko 3.4 *Korroosionkestävyysluokan CRC määrittäminen*

Korroosionkestävyystekijä (CRF)	Korroosionkestävyysluokka (CRC)
CRF = 1	I
0 ≥ CRF > -7	II
-7 ≥ CRF > -15	III
-15 ≥ CRF ≥ -20	IV
CRF < -20	V

Taulukko 3.5 *Ruostumattomat teräslajit korroosionkestävyysluokittain CRC*

Korroosionkestävyysluokka CRC				
I	**II**	**III**	**IV**	**V**
1.4003	1.4301	1.4401	1.4439	1.4565
1.4016	1.4307	1.4404	1.4462	1.4529
1.4512	1.4311	1.4435	1.4539	1.4547
	1.4541	1.4571		1.4410
	1.4318	1.4429		1.4501
	1.4306	1.4432		1.4507
	1.4567	1.4162		
	1.4482	1.4662		
		1.4362		
		1.4062		
		1.4578		

Huom. 1 Korroosionkestävyysluokat ovat tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan tämän menettelyn yhteydessä austeniittisen ja duplex ruostumattoman teräslajin valitsemiseksi ja ovat soveltuvia ainoastaan rakenteellisiin sovelluksiin.

Huom. 2 Korkeamman luokan teräslajia voidaan käyttää korroosionkestävyystekijän CRF edellyttämän sijasta.

3.5.3 Uimahalliolosuhteet

Jännityskorroosioriskin välttämiseksi uimahallien ilmasto-olosuhteissa käytetään altaan yläpuolella altistuvissa kuormaa kantavissa osissa ainoastaan taulukon 3.6 mukaisia teräslajeja.

Taulukko 3.6 *Ruostumattomat teräslajit sisäuimahallien ympäristöolosuhteisiin*

Kuormaa kantavat rakenneosat uimahallin ympäristöolosuhteissa	**Korroosionkestävyysluokka CRC**
Kuormaa kantavat rakenneosat, joita puhdistetaan säännöllisesti [1]	CRC III tai CRC IV (pois lukien 1.4162, 1.4662, 1.4362, 1.4062)
Kuormaa kantavat rakenneosat, joita ei puhdisteta säännöllisesti	CRC V (pois lukien 1.4410, 1.4501 and 1.4507)
Kaikki kiinnitystarvikkeet, kiinnittimet ja kierteitetyt osat	CRC V (pois lukien 1.4410, 1.4501 and 1.4507)
Huom. 1 Jos rakenneosalle edellytetään säännöllinen korroosiotarkastus ja puhdistus, on tämä esitettävä käyttäjälle kirjallisesti. Tarkastus, puhdistusmenetelmä ja taajuus määritellään. Mitä useammin puhdistus tehdään, sitä parempi hyöty saavutetaan. Puhdistusvälin tulisi olla vähintään kerran viikossa. Jos puhdistus on määrätty, se on tehtävä kaikille rakenneosille, eikä vain niille, joihin on helppo pääsy tai jotka ovat hyvin näkösällä.	

3.5.4 Menettely ferriittisen ruostumattoman teräslajin valitsemiseksi

Ferriittiset ruostumattomat teräslajit ovat soveltuvia ympäristöolosuhteisiin, joissa on kohtalainen korroosiorasitus, mutta jotka kuitenkin sisältävät rajoitetusti ilmastosaasteita ja klorideja. Ferriittisten ruostumattomien terästen pinnan tahraantuminen on mahdollista useissa ympäristöolosuhteissa, mutta tämä on kuitenkin kosmeettista eikä vaikuta eheyteen. Taulukko 3.7 esitetään varmalla puolella oleva ohjeistus teräslajin valitsemiseksi neljälle ferriittiselle teräslajille.

Taulukko 3.7 *Ferriittisen ruostumattoman teräslajin valinta*

Teräslajin valinta, kun vaatimuksena on erittäin korkealaatuinen pinnan viimeistely (eli ei sallita näkyvää tahraantumista altistetulla pinnalla)					
Teräslaji	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	×	×	Ohjeistusta ei anneta puutteellisen korroosiotestiaineiston vuoksi	
1.4509	✓	×	×		
1.4621, 1.4521	✓	✓	×		
Teräslajin valinta, kun sallitaan kosmeettista korroosiota (eli tahraantuminen ja vähäinen pistekorroosio sallitaan, mikä ei kuitenkaan vaikuta kokoonpanon rakenteelliseen eheyteen)					
Teräslaji	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	(✓)	×	Ohjeistusta ei anneta puutteellisen korroosiotestiaineiston vuoksi	
1.4509	✓	✓	(✓)		
1.4621, 1.4521	✓	✓	✓		

Rasitusluokat on otettu standardista EN ISO 12944-2:2009 ja on määritetty seuraavasti:

Rasitusluokka ja riskiluokitus	Esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä lauhkeassa ilmastossa	
	Ulkona	Sisällä
C1 hyvin lievä		Lämmitetyt rakennukset, joissa puhtaat ilmatilat, esim. toimistot, kaupat, koulut ja hotellit.
C2 lievä	Ilmatilat, joissa epäpuhtauksien määrä on alhainen. Enimmäkseen maaseutualueita.	Lämmittämättömät rakennukset, joissa voi esiintyä kondensoitumista, esim. varastot, urheiluhallit.
C3 kohtalainen	Kaupunki- ja teollisuusilmatilat, joissa kohtalainen rikkidioksidikuormitus. Rannikkoalueet, joilla alhainen suolapitoisuus.	Tuotantotilat, joissa korkea kosteuspitoisuus ja jossain määrin epäpuhtauksia ilmassa, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot ja meijerit.
C4 ankara	Teollisuus- ja rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus on kohtalainen.	Kemianteollisuuden tuotantolaitokset, uima-altaat, rannikolla sijaitsevat telakat ja veneveistämöt,
C5 hyvin ankara	Teollisuusalueet, joilla kosteus on korkea ja ilmatila on syövyttävä. Rannikkoalueet ja rannikon ulkopuoliset alueet, joilla suolapitoisuus on korkea.	Rakennukset tai alueet, joilla kondensoituminen on miltei jatkuvaa ja saasteiden määrä korkea.

Huomautuksia

✓ tarkoittaa, että teräslaji on soveltuva kyseessä olevaan käyttöympäristöön

× tarkoittaa, että teräslaji ei ole soveltuva kyseessä olevaan käyttöympäristöön.

(✓) tarkoittaa, että erityistä huolellisuutta edellytetään näiden terästen valitsemiseksi käyttöympäristöön. Näillä teräslaji ja käyttöympäristö-yhdistelmillä voi tapahtua pinnan tahraantumista ja paikallista korroosiota alttiina olevissa hitseissä ja kiinnittimissä. Tämä riski on todennäköisin seisovassa vedessä ja/tai kun ilmastoperäisiä epäpuhtauksia (erityisesti klorideja) voi kerääntyä.

1. Rasitusluokassa C1 oletetaan, että käyttöympäristö on sisätila, jossa ei tapahdu altistumista sääolosuhteille tai klorideille.
2. Hitsit ja ruostumattoman teräksen läpi menevät kiinnittimet muodostavat rakoja, jotka voivat olla herkempiä korroosiolle altistuneella puolella kiinnitystä. Tämä riski on todennäköisin, kun pinnoille kerääntyy vettä ja ilmastoperäisiä epäpuhtauksia.
3. ISO:n mukainen luokitus ottaa huomioon mereltä tuulen mukana kulkeutuvat kloridit, mutta ei ota huomioon teiden jäänpoistosuolojen kulkeutumista. Käyttäjän tulee ottaa tämä huomioon, jos rakenne sijaitsee lähellä maantietä, jonka jäänpoistoon käytetään suolausta.

4 SUUNNITTELUPERUSTEET

4.1 Yleiset vaatimukset

Rakenne suunnitellaan ja valmistetaan ottaen huomioon seuraavat asiat:

- rakenne soveltuu käyttöön sen tarkoitettuna elinaikana;
- rakenne kestää kuormitukset, jotka voivat esiintyä rakentamisen, asennuksen ja käytön aikana;
- onnettomuudesta aiheutuvien ylikuormitusten aiheuttamat vauriot jäävät paikallisiksi;
- rakenteella on riittävä säilyvyys suhteessa huoltokustannuksiin.

Edellä olevat vaatimukset voidaan täyttää sopivalla materiaalien valinnalla, tarkoituksenmukaisella suunnittelulla ja yksityiskohdilla sekä määrittämällä rakentamiselle lajinvalvontamenetelmät ja huolto-ohjelma.

Rakenteet suunnitellaan ottamalla huomioon kaikki kyseeseen.

4.2 Rajatilamitoitus

Rajatiloilla tarkoitetaan tilanteita, joiden ylittyessä rakenne ei enää täytä asetettuja toimivuusvaatimuksia. Käytetään kolmea rajatilaa: murtorajatila, käyttörajatila ja säilyvyys. Murtorajatiloilla tarkoitetaan tilanteita, joiden ylittyminen voi aiheuttaa rakenteen tai sen osan murtumiseen vaarantaen ihmisten turvallisuuden. Käyttörajatiloilla tarkoitetaan tilanteita, joiden ylittymisen jälkeen rakenteen käytölle asetettuja vaatimuksia ei enää täytetä. Säilyvyyttä koskeva rajatila voidaan käsittää murto- ja käyttörajatilojen osajoukoksi riippuen siitä vaikuttaako esim. korroosio rakenteen lujuuteen vai esteettiseen ilmeeseen.

Murtorajatiloissa seuraavan ehdon tulee olla voimassa:

$$E_\mathrm{d} \leq R_\mathrm{d} \tag{4.1}$$

missä:

E_d on tarkasteltavaan rakenneosaan vaikuttavan voiman tai momentin mitoitusarvo, joka aiheutuu kuorman osavarmuusluvuilla kerrotuista kuormista ja

R_d on kestävyyden mitoitusarvo, jonka laskemiseksi tässä käsikirjassa esitetään suosituksia.

Kestävyyden mitoitusarvo R_d esitetään yleensä muodossa $R_\mathrm{k}/\gamma_\mathrm{M}$ missä R_k on kestävyyden ominaisarvo ja γ_M on osavarmuusluku. Osavarmuusluku γ_M saa erilaisia arvoja. Taulukossa 4.1 esitetään tässä käsikirjassa käytetyt osavarmuuslukujen γ_M arvot. Nämä arvot on otettu standardista EN 1993-1-4 ja EN 1993-1-8. Näitä arvoja käytetään osavarmuusluvuille γ_M myös, kun suunnitellaan muiden standardin EN 1993 osien mukaisesti, esimerkiksi silloille (EN 1993-2), tai torneille, mastoille ja savupiipuille (EN 1993-3), korvaten siten näissä osissa annetut suositusarvot osavarmuusluville γ_M .

Suunnitteluasiakirjoissa tulee viitata standardin EN 1993-1-4 ja muiden standardin EN 1993 tarpeellisten osien kansallisiin liitteisiin, koska niissä voidaan edellyttää

osavarmuuslukujen γ_M arvoille käytettäväksi muita arvoja kuin taulukossa 4.1 on esitetty. (Jos kansallista liitettä ei ole laadittu, osavarmuuslukujen γ_M arvot tulee sopia kansallisen viranomaisen kanssa.)

Tässä käsikirjassa esitetään sääntöjä rakenteiden kestävyyden määrittämiseksi laskennollisesti. Vaihtoehtoisesti rakenteiden kestävyys voidaan määrittää kokeellisesti, ks. kohta 10.

Taulukko 4.1 *Osavarmuusluvun γ_M suositeltavat arvot*

Kestävyys:	**Merkintä**	**Lukuarvo (EN 1993-1-4)[2) 3) 4)]**
Poikkileikkaus (kaikille poikkileikkausluokille)	γ_{M0}	1,10
Sauvojen nurjahdus	γ_{M1}	1,10
Poikkileikkauksen murtuminen vetokuormalla	γ_{M2}	1,25
Ruuvikiinnitykset, hitsit, niveltapit ja levyt reunapuristuksella	γ_{M2}	1,25

Niille ruostumattomille teräslajeille, joita ei ole standardin EN 1993-1-4+A1:2015 taulukossa 2.1 esitetty, osavarmuusluvun γ_M arvoja korotetaan 10%:llä.

4.3 Kuormitukset

Kuormitukset ruostumattomasta teräksestä valmistetuille rakenteille määritellään samalla tavoin kuin hiiliteräksestä valmistetuille rakenteille standardin EN 1991 mukaisesti

5 POIKKILEIKKAUSTEN OMINAISUUDET

5.1 Yleistä

Kohtien 5 ja 6 ohjeita sovelletaan poikkileikkauksiin, joiden taso-osat täyttävät kohdan 5.2 mukaiset mittavaatimukset

Puristettujen tai osittain puristettujen taso-osien leveys-paksuussuhteet ratkaisevat ovatko ko. taso-osat lommahdusalttiit, mistä puolestaan aiheutuu poikkileikkauksen kestävyyden pieneneminen. Taso-osat ja poikkileikkaukset jaetaan niiden lommahdusherkkyyden ja kiertymiskyvyn (luokka 1 ja 2) perusteella poikkileikkausluokkiin 1, 2, 3 ja 4, ks. kohta 5.3.

Poikkileikkausluokan 4 kestävyyden pieneneminen voidaan ottaa mitoituksessa huomioon käyttämällä poikkileikkauksen taso-osien tehollisia leveyksiä, ks. kohta 5.4.1.

Poikkileikkauksen keskilinjoja voidaan käyttää poikkileikkausominaisuuksien määrittämiseksi vain, kun kyseessä on kylmämuovaamalla tehty levy tai sauva. Muille poikkileikkauksille käytetään kokonaismittoja. Standardit EN 1993-1-3 ja EN 1993-1-5 sallivat keskilinjojen käytön kestävyyksiä laskettaessa. Standardi EN 1993-1-1 sallii myös keskilinjojen käytön kestävyyksiä laskettaessa tietyissä tapauksissa, ks. standardin EN 1993-1-1 kohdat 6.2.1(9) ja 6.2.5(2).

5.2 Suurimmat sallitus leveys-paksuussuhteet

Taulukossa 5.1 esitetään suurimmat sallitut taso-osien leveys-paksuussuhteet.

5.3 Poikkileikkausluokitus

5.3.1 Yleistä

Periaatteessa ruostumattomasta teräksestä tehdyt poikkileikkaukset voidaan luokitella samalla tavalla kuin hiiliteräksestä tehdyt poikkileikkaukset. Neljä poikkileikkausluokkaa määritellään seuraavasti:

PL 1 Poikkileikkausluokat 1 ovat niitä, joissa plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä.

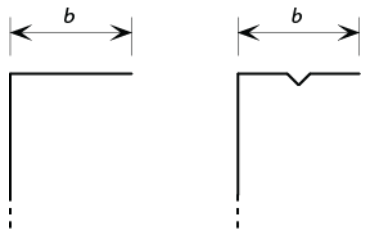
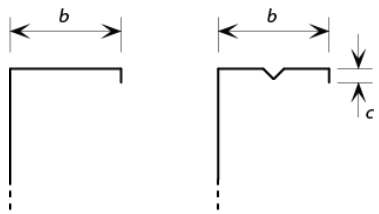
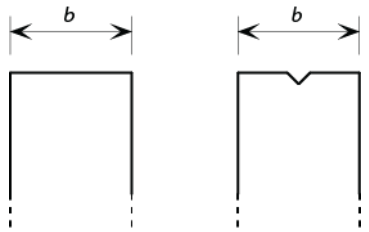
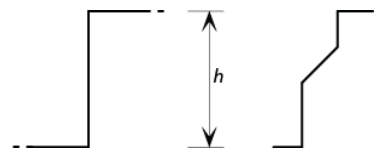
PL 2 Poikkileikkausluokat 2 ovat niitä, joissa voi kehittyä plastisuusteorian mukainen sauvan taivutuskestävyys, mutta joilla on rajoitettu kiertymiskyky.

PL 3 Poikkileikkausluokat 3 ovat niitä, joissa sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen.

PL 4 Poikkileikkausluokat 4 ovat niitä, joissa paikallinen lommahdus esiintyy, ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä.

Poikkileikkausluokitus määräytyy profiilin kokonaan tai osittain puristetun taso-osan suurimman hoikkuuden (epäsuotuisin tapaus) perusteella. Tulee huomata, että poikkileikkausluokka voi vaihdella sauvan pituussuunnassa taivutusmomentin ja normaalivoiman suhteista riippuen.

Taulukko 5.1 *Taso-osien suurimmat sallitus leveys-paksuussuhteet*

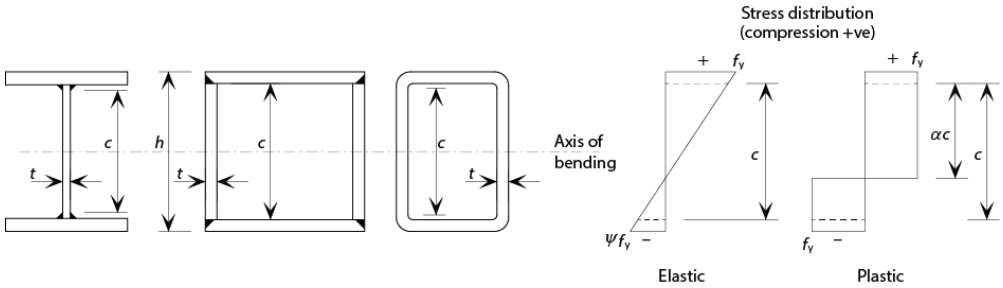
a) Taso-osa tai välijäykisteellinen taso-osa, joka liittyy uumaan yhdeltä reunalta, ja toinen reuna on vapaasti tuettu	$b/t \leq 50$	
b) Taso-osa tai välijäykisteellinen taso-osa, joka liittyy uumaan yhdeltä reunalta, ja toisessa reunassa on pieni yksinkertainen jäykiste	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$	
c) Taso-osa tai välijäykisteellinen taso-osa, joka liittyy molemmilta reunoiltaan uumiin tai laippoihin	$b/t \leq 400$	
	$h/t \leq 400$	
Huom.: Tapauksen (a) mukaisesti tuettuihin taso-osiin, joiden b/t-suhde on suurempi kuin noin 30 ja muulla tavalla tuettuihin taso-osiin, joiden b/t-suhde on suurempi kuin noin 75, syntyy todennäköisesti selvästi näkyvää lommoilua käyttörajatilan mitoituskuormilla.		

5.3.2 Poikkileikkausluokkien taso-osien rajahoikkuudet

Poikkileikkaukset luokitellaan luokkiin 1, 2 ja 3 niiden taso-osien rajahoikkuuksien mukaan taulukon 4.2 mukaan. Poikkileikkaukset, jotka eivät täytä poikkileikkausluokan 3 vaatimuksia, kuuluvat poikkileikkausluokkaan 4.

Taulukko 5.2 *Puristettujen taso-osien suurimmat sallitut leveys-paksuus suhteet*

Kahdelta reunalta tuetut taso-osat



Poikkileikka usluokka	Taivutuksen rasittamat osat	Puristetut osat	Taivutuksen ja puristuksen rasittamat osat
1	$c/t \leq 72{,}0\varepsilon$	$c/t \leq 33{,}0\varepsilon$	Kun $\alpha > 0{,}5$: $c/t \leq 396{,}0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ Kun $\alpha \leq 0{,}5$: $c/t \leq 36{,}0\varepsilon/\alpha$
2	$c/t \leq 76{,}0\varepsilon$	$c/t \leq 35{,}0\varepsilon$	Kun $\alpha > 0{,}5$: $c/t \leq 420{,}0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ Kun $\alpha \leq 0{,}5$: $c/t \leq 38{,}0\varepsilon/\alpha$
3	$c/t \leq 90{,}0\varepsilon$	$c/t \leq 37{,}0\varepsilon$	$c/t \leq 18{,}5\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ katso 5.4.1

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

Teräslaji	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

Huom.:

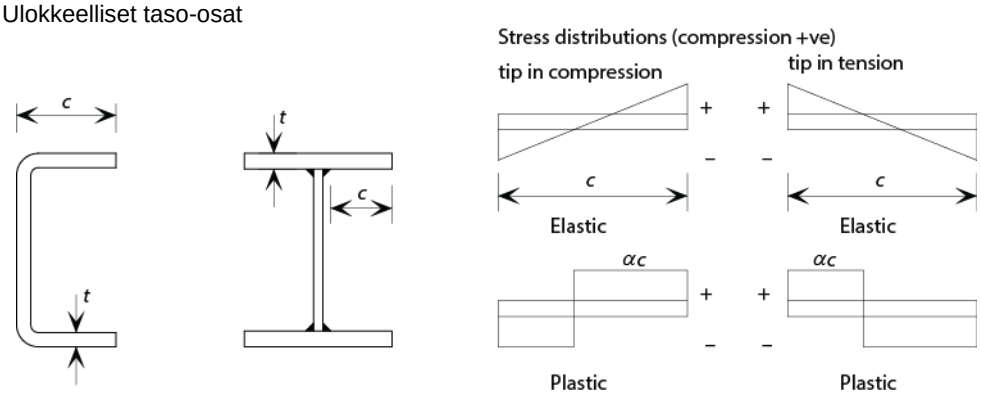
Rakenneputkille c:n arvoksi voidaan valita arvo $(h - 3t) tai\ (b - 3t)$

E = 200×10^3 N/mm^2

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{f_y\, c \sum t_{\mathrm{w}}}\right)$$ vahvemman akselin suhteen symmetrisille poikkileikkauksille

Taulukko 5.2 (jatkoa) Puristettujen taso-osien suurimmat sallitut leveys-paksuussuhteet

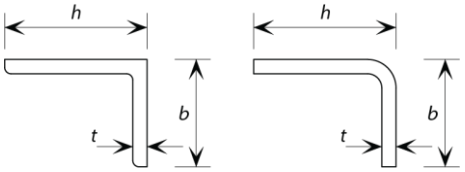
Ulokkeelliset taso-osat



Poikkileikkausluokka	Poikkileikkauksen tyyppi	Puristettu osa	Puristettu ja taivutettu osa	
			Reuna puristettu	Reuna puristettu
1	Kylmämuovattu ja hitsattu	$c/t \leq 9{,}0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Kylmämuovattu ja hitsattu	$c/t \leq 10{,}0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10{,}0\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10{,}0\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	Kylmämuovattu ja hitsattu	$c/t \leq 14{,}0\varepsilon$	$c/t \leq 21{,}0\,\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ $ks.5.4.1$	

Kulmateräkset

Myös ulokkeellisten taso-osien ehdot, ks. edellä, tarkistetaan



Ei sovelleta kulmateräksille, jotka kiinnitetään jatkuvasti toiseen rakenneosaan

Poikkileikkausluokka	Puristetut poikkileikkaukset
3	$\frac{h}{t} \leq 15{,}0\varepsilon$; $\frac{b+h}{2t} \leq 11{,}5\,\varepsilon$

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

Teräslaji	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

Huom.:

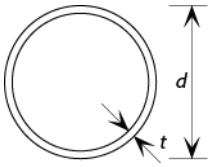
Kylmämuovatuille U-profiileille vähemmän konservatiivinen ohje on käyttää arvoa $c = b_p$ missä b_p on etäisyys laipan kärjestä nurkkasäteen keskelle (katso kuva 5.5).

E = 200×10^3 N/mm^2

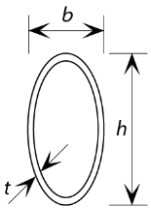
$$\alpha = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y\, c \sum t_w}\right)$$ vahvemman akselin suhteen symmetrisille poikkileikkauksille

Taulukko 5.2 *(jatkoa) Puristettujen taso-osien suurimmat sallitut leveys-paksuussuhteet*

Pyöreät rakenneputket



Elliptiset rakenneputket



Poikkileikkausluokka	Taivutettu poikkileikkaus		Puristettu poikkileikkaus	
1	$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$		$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$	
2	$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$		$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$	
3	$d_e/t \leq 280\varepsilon^2$ Kun $d_e > 240$ mm ja/tai $d_e/t > 280\varepsilon^2$, ks. EN 1993-1-6		$d_e/t \leq 90\varepsilon^2$ Kun $d_e/t > 90\varepsilon^2$, ks. EN 1993-1-6	
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$	Teräslaji	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm^2)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Huom.:

E = 200×10^3 N/mm^2

d_e on samanarvoinen halkaisija. Poikkileikkaukseltaan pyöreille rakenneputkille (CHS) $d_e = d$.

Elliptisille rakenneputkille (EHS) d_e valitaan kuormituksen perusteella

EHS kuormitettuna puristuksella:

$$d_e = h\left[1 + \left\{1 - 2{,}3\left(\frac{t}{h}\right)^{0,6}\right\}\left(\frac{h}{b} - 1\right)\right]$$

tai, varmalla puolella olevana $d_e = \frac{h^2}{b}$

EHS kuormitettuna taivutuksella vahvemman akselin (y-y) suhteen:

Kun $\frac{h}{b} \leq 1{,}36$ $\quad d_e = \frac{b^2}{h}$

Kun $\frac{h}{b} > 1{,}36$ $\quad d_e = 0{,}4\frac{h^2}{b}$

EHS kuormitettuna taivutuksella heikomman akselin (z-z) suhteen tai puristuksella ja taivutuksella heikomman akselin suhteen: $d_e = \frac{h^2}{b}$

EHS kuormitettuna puristuksella ja taivutuksella vahvemman akselin (y-y) suhteen, d_e voidaan määrittää lineaarisesti interpoloimalla puristuksella määritetyn samanarvoisen halkaisijan ja taivutuksella määritetyn halkaisijan välillä. Taivutuksella samanarvoinen halkaisija määritetään poikkileikkausluokissa 1 ja 2 perustuen tekijään α ja poikkileikkausluokissa 3 ja 4 tekijään ψ.

5.4 Teholliset leveydet

5.4.1 Poikkileikkausluokan 4 taso-osien teholliset leveydet

Poikkileikkausluokan 4 ominaisuudet voidaan laskea käyttäen kokonaan tai osittain puristettujen taso-osien tehollisia leveyksiä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kokeellista mitoitusta, ks. kohta 10.

Osittain tai kokonaan puristetun poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvan poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala A_{eff}, lasketaan vähentämällä bruttopoikkileikkauksen pinta-alasta tehottomien alueiden pinta-alat. Jokaisen poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvan taso-osan tehollinen pinta-ala saadaan kertomalla tehollinen leveys b_{eff} ko. osan paksuudella. Kun poikkileikkaus on taivutettu, lasketaan myös tehollinen jäyhyysmomentti I_{eff} ja tehollinen taivutusvastus W_{eff}.

Osittain tai kokonaan puristettujen taso-osien teholliset leveydet esitetään taulukossa 5.3 kahdelta sivulta tuetuille taso-osille ja taulukossa 5.4 ulokkeellisille taso-osille.

Puristetun laipan tehollinen leveys voidaan laskea bruttopoikkileikkauksen perustella lasketun jännityssuhteen ψ perusteella (ψ esitetään taulukoissa 5.3 ja 5.4). Uuman tehollinen leveys lasketaan sen poikkileikkauksen jännityssuhteen ψ perusteella, joka koostuu puristetun laipan tehollisesta leveydestä ja bruttopoikkileikkauksen mukaisesta uumasta ja vedetystä laipasta.

Pienennyskerroin ρ voidaan laskea seuraavasti:

Kylmämuovattujen tai hitsattujen profiilien kahdelta reunalta tuetut taso-osat:

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_{\text{p}}} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_{\text{p}}^2} \quad kuitenkin \leq 1{,}0 \tag{5.1}$$

Ulokkeellisten puristettujen taso-osien (kylmämuovatut tai hitsatut:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_{\text{p}}} - \frac{0{,}188}{\bar{\lambda}_{\text{p}}^2} \quad kuitenkin \leq 1{,}0 \tag{5.2}$$

missä $\bar{\lambda}_p$ on taso-osan suhteellinen hoikkuus, joka lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_{\text{p}} = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \tag{5.3}$$

missä:

- t on kyseeseen tuleva ainepaksuus;
- k_σ on taulukon 5.3 tai 5.4 mukaista jännityssuhdetta ψ vastaava lommahduskerroin;
- $\bar{b}$ kyseeseen tuleva leveys seuraavasti:
  - $\bar{b}$ $= d$ uumille (lukuun ottamatta suorakaiteen muotoisia rakenneputkia);
  - $\bar{b}$ = suorakaiteen muotoisen rakenneputken uuman taso-osan korkeus, jolle käytetään arvoa $h - 3t$
  - $\bar{b}$ $= b$ kahdelta reunalta tuetuille taso-osille (lukuun ottamatta suorakaiteen muotoisia rakenneputkia);
  - $\bar{b}$ = suorakaiteen muotoisen rakenneputken laipan taso-osan leveys, jolle käytetään arvoa $b - 3t$
  - $\bar{b}$ $= c$ yhdestä reunasta tuetuille taso-osille;
  - $\bar{b}$ $= h$ tasakylkisille L-profiileille tai erikylkisille L-profiileille
- ε on materiaalista riippuva tekijä, ks. taulukko 5.2.

Standardissa EN 1993-1-4 esitetään että suureelle $\bar{b}$ RHS profiilien uumille ja laipoille voidaan varmalla puolella olevana arvona käyttää $h - 2t$ ja $b - 2t$ Standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa oletetaan, että nämä tulevat olemaan $h - 3t$ ja $b - 3t$, ja ovat siten yhdenmukaisia standardin EN 1993-1-5 määritysten kanssa.

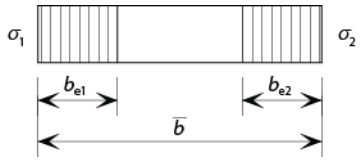
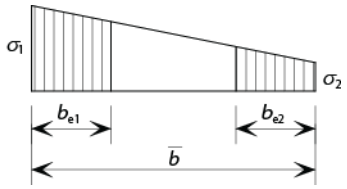
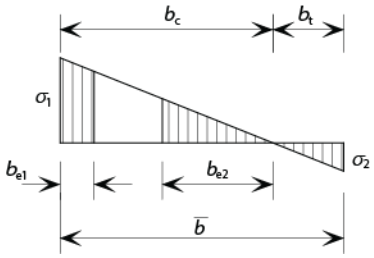
Kylmämuovatuille avoprofiileille konservatiivinen arvo on $\bar{b} = b_{\mathrm{p}}$ missä b_{p} on käsitteellinen taso-osan leveys, joka mitataan vierekkäisten nurkkien keskipisteiden etäisyytenä (ks. kuva 5.5)

Yleensä tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli siirtyy matkan e verrattuna bruttopoikkileikkaukseen, ks. kuvat 5.1 ja 5.2. Tämä siirtyminen otetaan huomioon laskettaessa tehollisen poikkileikkauksen ominaisuuksia.

Kun poikkileikkaukseen kohdistuu aksiaalinen puristus, lisämomentin ΔM huomioon ottamiseksi noudatetaan kohdan 6.5.2 ohjeita:

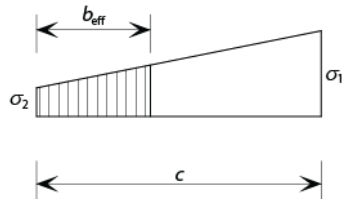
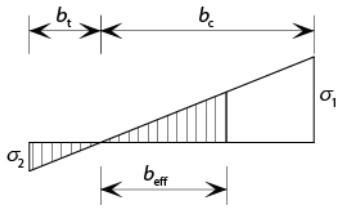
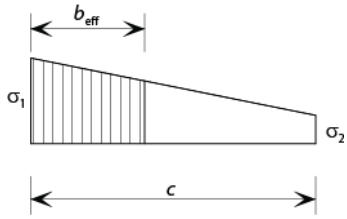
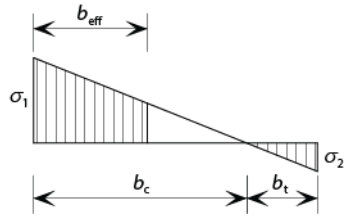
$\Delta M = N e_{\mathrm{N}}$
missä e_{N} on tasaisen puristuksen aiheuttama poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtymä, ks. kuva 5.2.

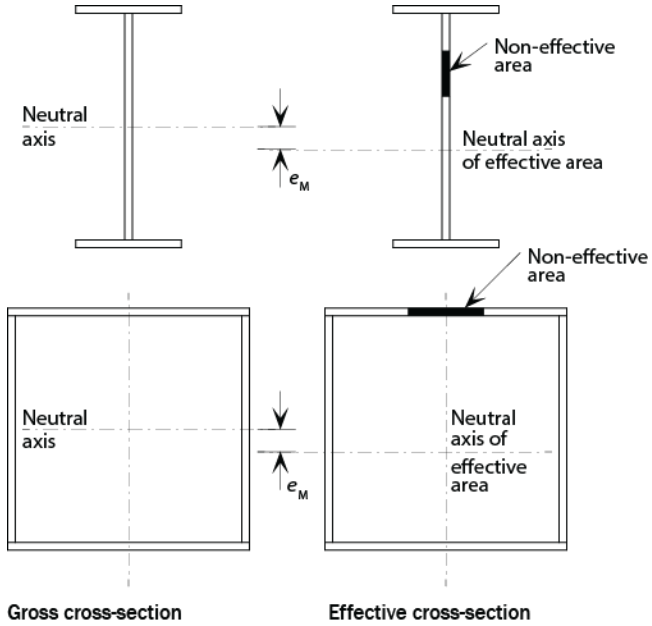
Taulukko 5.3 *Kahdelta reunalta puristetut taso-osat*

Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)	Tehollinen leveys b_{eff}
	<u>$\psi = 1$:</u> $b_{\mathrm{eff}} = \rho\bar{b}$ $b_{\mathrm{e1}} = 0{,}5 b_{\mathrm{eff}}$ $b_{\mathrm{e2}} = 0{,}5 b_{\mathrm{eff}}$
	<u>$1 > \psi \geq 0$:</u> $b_{\mathrm{eff}} = \rho\bar{b}$ $b_{\mathrm{e1}} = \dfrac{2\, b_{\mathrm{eff}}}{5 - \psi}$ $b_{\mathrm{e2}} = b_{\mathrm{eff}} - b_{\mathrm{e1}}$
	<u>$\psi < 0$:</u> $b_{\mathrm{eff}} = \rho b_{\mathrm{c}} = \rho\bar{b}/(1 - \psi)$ $b_{\mathrm{e1}} = 0{,}4 b_{\mathrm{eff}}$ $b_{\mathrm{e2}} = 0{,}6 b_{\mathrm{eff}}$

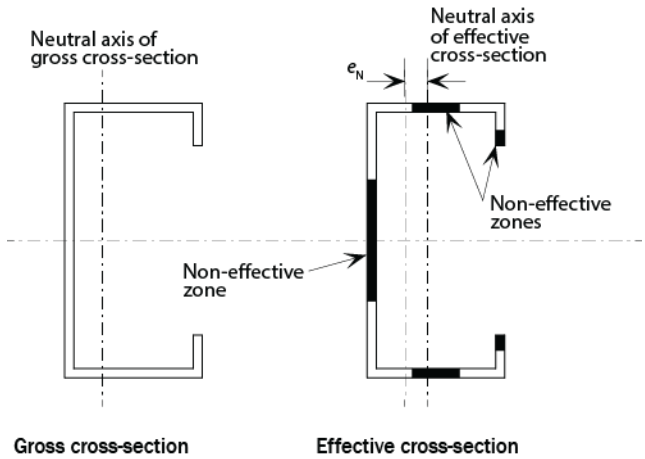
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Lommah-duskerroin k_σ	4,0	$8{,}2 / (1{,}05 + \psi)$	7,81	$7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\psi^2$	23,9	$5{,}98\,(1 - \psi)^2$

Taulukko 5.4 *Yhdeltä reunalta tuetut puristetut taso-osat*

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



Kuva 5.1 *Poikkileikkausluokan 4 poikkileikkaus, kun siihen kohdistuu taivutusmomentti*



Kuva 5.2 *Poikkileikkausluokan 4 poikkileikkaus, kun siihen kohdistuu puristusvoima*

5.4.2 Leikkausviipeen vaikutukset

Leikkausviipeen vaikutukset laipoissa voidaan jättää huomioon ottamatta jos $b_0 < L_e/50$, missä b_0 laipan ulokkeen pituus tai puolet kahdelta reunalta tuetun tasoosan leveydestä ja L_e on taivutusmomentin nollakohtien välinen etäisyys. Kun rajaarvo suureelle b_0 ylittyy, leikkausviipeen vaikutus laipoissa tulee ottaa huomioon; rakenneteräksille standardissa EN 1993-1-5 annettua ohjeistusta sovelletaan. Huomaa, että EN 1993-1-5 edellyttää leikkausviipeen vaikutuksen otettavaksi huomioon sekä murto- että käyttörajatilatarkasteluissa.

5.4.3 Laipan kaareutuminen

Palkin tai profiilin epätavallisen leveän laipan tapauksessa otetaan huomioon laipan kaareutumisen vaikutus poikkileikkauksen kestävyyteen, mikäli laipan kaareutuminen on suurempi kuin 5 % poikkileikkauksen korkeudesta.

Jos laipan kaareutuminen on tätä suurempi, niin kestävyyden pienennys, esimerkiksi leveiden laippojen keskinäisen etäisyyden pienenemisen ja mahdollisen uuman taivutuksen johdosta, tulee ottaa huomioon.

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen tyypillisten palkkien laipan leveys-paksuus-suhteet ovat sellaisia, että ne eivät ole herkkiä laipan kaareutumiselle. Tarvittaessa sovelletaan standardissa EN 1993-1-3 esitettyjä ohjeita.

5.5 Jäykistetyt taso-osat

5.5.1 Reunajäykisteet

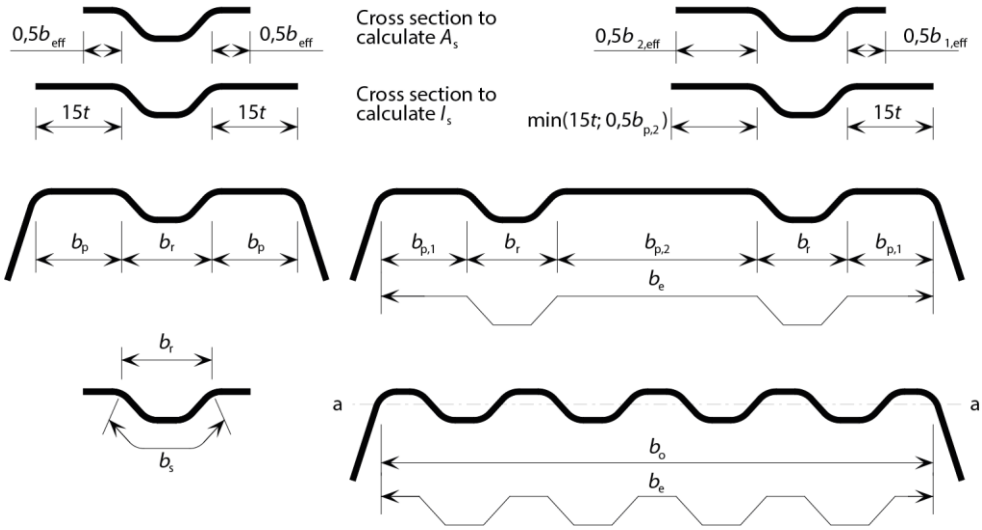
Sovelletaan hiiliteräkselle kehitettyjä EN 1993-1-3:n mukaisia ohjeita.

5.5.2 Välijäykisteet

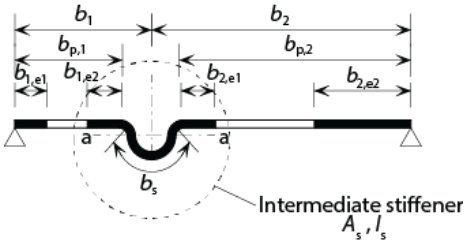
Sovelletaan hiiliteräkselle kehitettyjä EN 1993-1-3:n mukaisia ohjeita.

5.5.3 Välijäykisteelliset muotolevyt, välijäykiste laipassa

Kun laippaan kohdistuu tasainen puristus, välijäykisteellisen laipan tehollisen pinta-alan oletetaan koostuvan kahdesta pienennetystä välijäykisteen tehollisesta pinta-alasta $A_{s,red}$ ja kahdesta $0{,}5b_{eff}$:n tai 15 t:n levyisestä kaistasta, jotka tukeutuvat uumien nurkkiin, katso kuva 5.3 ja kuva 5.4.



Kuva 5.3 *Puristettu laippa, jossa yksi, kaksi tai kolme jäykistettä*



Kuva 5.4 *Välijäykiste*

Laipan keskellä olevalle yhdelle jäykisteelle kimmoteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys $\sigma_{cr,s}$ (jota käytetään $\bar{\lambda}_d$:n laskemiseksi) lasketaan kaavasta:

$$\sigma_{\mathrm{cr,s}} = \frac{4{,}2k_{\mathrm{w}}E}{A_{\mathrm{s}}}\sqrt{\frac{I_{\mathrm{s}}\,t^3}{4b_p^2(2b_{\mathrm{p}}+3b_{\mathrm{s}})}} \tag{5.4}$$

missä:

b_{p} on taso-osan käsitteellinen (teoreettinen) leveys

b_{s} on jäykisteen leveys mitattuna jäykisteen piiriä

I_{s} on jäykisteen tehollinen jäyhyysmomentti

A_{s} on välijäykisteen tehollinen pinta-ala, eli $t\left(b_{1,e2}+b_{2,e1}+b_s\right)$;

Nämä parametrit on määritelty kuvassa 5.3, kuvassa 5.4 ja kuvassa 5.5.

k_{w} on kerroin, joka ottaa huomioon uumista tai muista viereisistä osista aiheutuvan jäykistetyn laipan osittaisen kiertymistuennan, ks. jäljempänä. Laskettaessa aksiaalisesti puristetun poikkileikkauksen tehollista poikkileikkausta käytetään arvoa k_{w} = 1,0.

Kahden symmetrisesti sijaitsevan laippajäykisteen tapauksessa kimmoteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys $\sigma_{\mathrm{cr,s}}$ lasketaan kaavasta:

$$\sigma_{\mathrm{cr,s}} = \frac{4{,}2k_{\mathrm{w}}E}{A_{\mathrm{s}}}\sqrt{\frac{I_{\mathrm{s}}\,t^3}{8b_1^2(3b_{\mathrm{e}}-4b_1)}} \tag{5.5}$$

missä:

$$b_{\mathrm{e}} = 2b_{\mathrm{p,1}} + b_{\mathrm{p,2}} + 2b_{\mathrm{s}} \tag{5.6}$$

$$b_1 = b_{\mathrm{p,1}} + 0{,}5b_{\mathrm{r}} \tag{5.7}$$

missä:

$b_{\mathrm{p,1}}$ on uloimman taso-osan käsitteellinen (teoreettinen) leveys kuvan 5.4 mukaan

$b_{\mathrm{p,2}}$ on keskellä olevan taso-osan käsitteellinen (teoreettinen) leveys kuvan 5.4 mukaan

b_{r} on jäykisteen kokonaisleveys kuvan 5.3 mukaan.

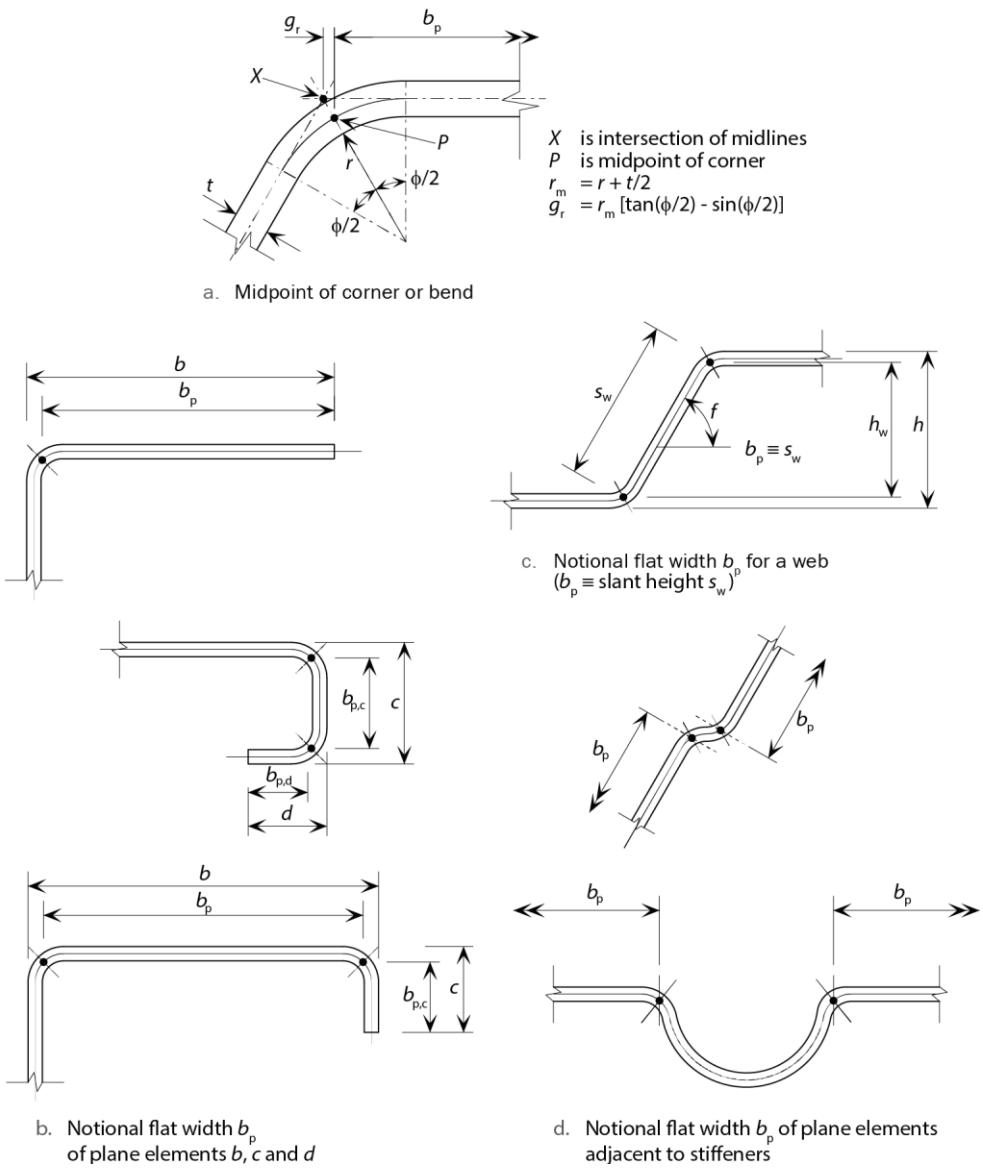
k_{w} voidaan laskea puristuslaipan nurjahdusaallon pituudesta l_{b} seuraavasti:

$$\frac{l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}} \geq 2, \quad k_{\mathrm{w}} = k_{\mathrm{wo}} \tag{5.8}$$

$$\frac{l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}} < 2, \quad k_{\mathrm{w}} = k_{\mathrm{wo}} - (k_{\mathrm{wo}}-1)\left[\frac{2l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}} - \left(\frac{l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}}\right)^2\right] \tag{5.9}$$

where:

s_{w} on uuman vino korkeus kuvan 5.5 mukaisesti.



Kuva 5.5 *Taso-osien käsitteelliset leveydet b_p ottaen huomioon nurkan pyöristyssäde*

Vaihtoehtoisesti kiertymistuentaa kuvaavan kertoimen k_w voidaan olettaa varmalla puolella olevana arvona käyttää 1,0, joka vastaa nivelellisestä tuentaa.

Arvot l_b ja k_wo voidaan laskea seuraavasti:

a) kun puristetussa laipassa on yksi välijäykiste:

$$l_\mathrm{b} = 3{,}07 \sqrt[4]{\frac{I_\mathrm{s}\, b_\mathrm{p}^2 (2b_\mathrm{p} + 3b_\mathrm{s})}{t^3}} \tag{5.10}$$

$$k_\mathrm{wo} = \sqrt{\frac{s_\mathrm{w} + 2b_\mathrm{d}}{s_\mathrm{w} + 0{,}5b_\mathrm{d}}} \tag{5.11}$$

$$b_\mathrm{d} = 2b_\mathrm{p} + b_\mathrm{s} \tag{5.12}$$

b) kun puristetussa välijäykisteessä on kaksi tai kolme välijäykistettä:

$$l_{\mathrm{b}} = 3{,}65\sqrt[4]{\frac{I_{\mathrm{s}} b_1^2 (3b_{\mathrm{e}} - 4b_1)}{t^3}} \tag{5.13}$$

$$k_{\mathrm{wo}} = \sqrt{\frac{(2b_{\mathrm{e}} + s_{\mathrm{w}})(3b_{\mathrm{e}} - 4b_1)}{b_1(4b_{\mathrm{e}} - 6b_1) + s_{\mathrm{w}}(3b_{\mathrm{e}} - 4b_1)}} \tag{5.14}$$

Pienennetyn tehollisen pinta-alan $A_{\mathrm{s,red}}$ omaavan jäykisteen vääristymisnurjahdus (distortional buckling) otetaan huomioon seuraavan kaavan mukaan:

$$A_{\mathrm{s,red}} = \chi_{\mathrm{d}} A_{\mathrm{s}} \frac{f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M0}}}{\sigma_{\mathrm{com,Ed}}} \text{ but } A_{\mathrm{s,red}} \leq A_{\mathrm{s}} \tag{5.15}$$

missä:

$\sigma_{\mathrm{com,Ed}}$ on jäykisteen keskilinjan puristusjännitys (joka lasketaan tehollisen poikkileikkauksen mukaan).

Jos uumat ovat jäykisteettömiä, pienennyskerroin χ_{d} lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} \leq 0{,}65 \qquad \chi_{\mathrm{d}} = 1{,}0 \tag{5.16}$$

$$0{,}65 < \bar{\lambda}_{\mathrm{d}} < 1{,}38 \qquad \chi_{\mathrm{d}} = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} \tag{5.17}$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} \geq 1{,}38 \qquad \chi_{\mathrm{d}} = \frac{0{,}66}{\bar{\lambda}_{\mathrm{d}}} \tag{5.18}$$

missä $\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} = \sqrt{f_{\mathrm{y}}/\sigma_{\mathrm{cr,s}}}$

Jos myös uumat ovat jäykistettyjä, viitataan EN 1993-1-3.

Poikkileikkauksen tehollisia ominaisuuksia laskettaessa pienennetty tehollinen pinta-ala $A_{\mathrm{s,red}}$ lasketaan ottamalla huomioon kaikki arvoon A_{s} mukaan luettavien taso-osien pienennetyksi paksuudeksi arvo $t_{\mathrm{red}} = t\,A_{\mathrm{red}} / A_{\mathrm{s}}$.

5.6 Poikkileikkausominaisuuksien laskenta

5.6.1 Yleistä

Poikkileikkausominaisuudet lasketaan lujuusopin perussääntöjen mukaan ottaen tarvittaessa huomioon paikallisen lommahduksen ja reikien aiheuttama brutto-poikkileikkauksen heikkeneminen.

5.6.2 Pyöristettyjen nurkkien vaikutus

Nurkkapyöristysten vaikutus poikkileikkauksen kestävyyteen voidaan jättää huomioon ottamatta, mikäli sisemmän nurkan pyöristyssäde $r \leq 5t$ ja $r \leq 0{,}10b_{\mathrm{p}}$ ja poikkileikkauksen voidaan olettaa koostuvan teräväkulmaisista taso-osista. Poikkileikkauksen jäykkyysominaisuuksiin nurkkapyöristyksen vaikutus otetaan aina huomioon.

Nurkkapyöristyksen vaikutus voidaan ottaa huomioon riittävällä tarkkuudella pienentämällä muutoin samanlaisen poikkileikkauksen ominaisuuksia, jotka lasketaan terävien nurkkien perusteella, ks. kuva 4.7, käyttämällä seuraavia likimääräistyksiä:

$$A_{\mathrm{g}} = A_{\mathrm{g,sh}}\,(1 - \delta) \tag{5.19}$$

$$I_{\mathrm{g}} = I_{\mathrm{g,sh}}\,(1 - 2\delta) \tag{5.20}$$

$$I_{\mathrm{w}} = I_{\mathrm{w,sh}}\,(1 - 4\delta) \tag{5.21}$$

missä:

$$\delta = 0{,}43\,\frac{\sum_{j=1}^{n} r_j \frac{\varphi_j}{90^o}}{\sum_{i=1}^{m} b_{\mathrm{p},i}} \tag{5.22}$$

missä:

A_{g} on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala

$A_{\mathrm{g,sh}}$ on A_{g}:n arvo terävänurkkaiselle poikkileikkaukselle;

$b_{\mathrm{p},i}$ on terävänurkkaisen poikkileikkauksen taso-osan *i* käsitteellinen (teoreettinen) leveys

I_{g} on bruttopoikkileikkauksen jäyhyysmomentti

$I_{\mathrm{g,sh}}$ on I_{g}:n arvo terävänurkkaiselle poikkileikkaukselle

I_{w} on bruttopoikkileikkauksen käyristymisjäyhyys

$I_{\mathrm{w,sh}}$ on I_{w}:n arvo terävänurkkaiselle poikkileikkaukselle

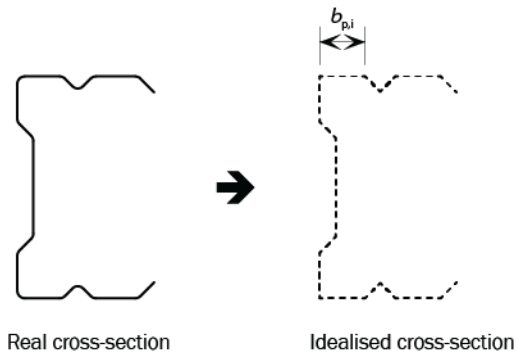
φ_j on kahden taso-osan välinen kulma

m on taso-osien lukumäärä

n on nurkkien lukumäärä

r_j on nurkan *j* sisäsäde.

Edellä esitettyjä pienennyksiä voidaan soveltaa myös laskettaessa tehollisia poikkileikkausarvoja A_{eff}, $I_{\mathrm{y,eff}}$, $I_{\mathrm{z,eff}}$ ja $I_{\mathrm{w,eff}}$ edellyttäen, että taso-osien käsitteelliset (teoreettiset) leveydet määritetään niiden keskilinjojen leikkauspisteisiin.



Kuva 5.6 *Todellinen ja idealisoitu poikkileikkaus*

5.6.3 Bruttopoikkileikkaus

Poikkileikkausominaisuuksia laskettaessa kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon. Suuret aukot tulee sen sijaan ottaa huomioon.

5.6.4 Nettopoikkileikkaus

Poikkileikkauksen tai sen osan bruttopinta-alaksi valitaan bruttopinta-ala, josta vähennetään kaikki aukot kiinnittimien reiät mukaan lukien. Kiinnittimien reikiä vähennettäessä käytetään reikien nimellisiä halkaisijoita.

Kun reikiä ei ole limitetty, bruttopoikkileikkauksesta vähennettäväksi pinta-alaksi valitaan vaikuttavaa jännitystä vastaan kohtisuorassa olevien reikien pinta-alojen yhteenlaskettu suurin summa (katso murtumalinja (2) kuvassa 5.7).

Kiinnittimien reikien ollessa limitettyjä, kiinnittimien reikien vähennettäväksi kokonaispinta-alaksi valitaan suurempi seuraavista arvoista:

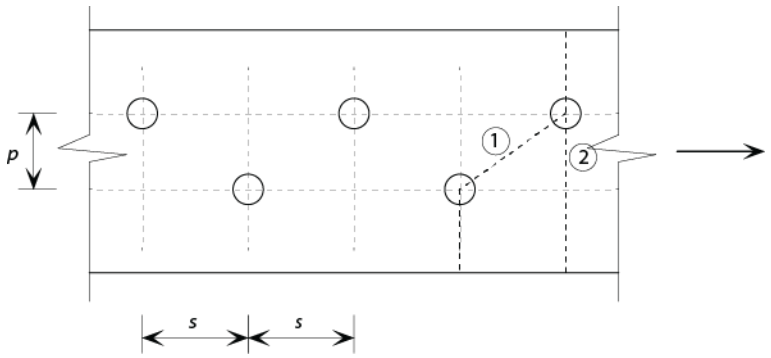
- limittämättömille rei'ille sovellettava vähennys
- $t\left(nd_0 - \sum\left[\frac{s^2}{4p}\right]\right)$

missä:

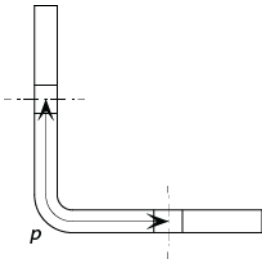
s	on sarjaan kuuluvien kahden vierekkäisen limitetyn reiän keskiöiden välinen etäisyys sauvan akselin suunnassa
p	on kahden vierekkäisen reiän keskiöiden välinen etäisyys mitattuna kohtisuorassa suunnassa sauvan akselin suhteen
t	on aineenpaksuus
n	on niiden reikien lukumäärä, jotka sijaitsevat diagonaalisesti tai sik-sak-linjassa sauvassa tai sauvan osassa, katso kuva 5.7
d_0	on reiän halkaisija.

Kulmateräksillä ja vastaavissa tapauksissa, joissa reiät ovat eri kyljissä, mitta p lasketaan kuvan 5.8 mukaan rakenneosan keskilinjaa pitkin.

Kulmateräkset, jotka kiinnitetään yhdeltä sivulta, ks. kohta 7.2.



Limitetyt reiät ja kriittiset murtolinjat 1 ja 2



Kuva 5.8 *Mittapituus kulmateräkselle, jonka molemmissa laipoissa on reiät*

5.7 Poikkileikkauskestävyydet

5.7.1 Yleistä

Tämä kohta käsittelee ainoastaan poikkileikkauskestävyyksiä; sauvan kestävyyden todentamiseksi edellytetään myös mahdollisten nurjahdusmuotojen tarkistus. Sauvojen nurjahdusta käsitellään kohdassa 6. Poikkileikkauskestävyyden laskennassa käytettävät γ_{M} – arvot on annettu taulukossa 4.1.

Kylmämuokkaukseen liittyvä muokkauslujittuminen (ks. kohta 2.2.1) yleensä kasvattaa poikkileikkauksen kestävyyttä. Liitteessä B on annettu ohjeita valmistuksen aikana tapahtuvan lujittumisen määrittämiseksi.

Käytön aikana muokkauslujittumisen suotuisa vaikutus kohottaa poikkileikkauksen kestävyyden mitoitusarvoa voidaan ottaa huomioon käyttämällä jatkuvan lujittumisen menetelmää (Continuous Strength Method), joka on kuvattuna liitteessä D. Vaihtoehtoisesti lujuuden kohoaminen muokkauslujittumisen vaikutuksesta voidaan ottaa huomioon kokeellisesti (ks. kohta 10).

5.7.2 Vedetyt poikkileikkaukset

Pelkästään tasaisesti vedetyn poikkileikkauksen vetokestävyys $N_{t.Rd}$ on pienempi arvoista:

a) bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo

$$N_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{A_{\mathrm{g}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} \tag{5.23}$$

b) nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo kiinnittimien reikien kohdalla

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{k\, A_{\mathrm{net}}\, f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{5.24}$$

missä:

A_{g} on poikkileikkauksen bruttopinta-ala

A_{net} on poikkileikkauksen nettopinta-ala (ks. kohta 5.6.4)

f_{y} on karakteristinen myötölujuus (yleensä käytetään 0,2 % rajan minimilujuutta, ks taulukko 2.2)

f_u on karakteristinen murtolujuus (yleensä käytetään minimi murtolujuuden arvoa ks. taulukko 2.2)

k on kerroin, joka valitaan reikien valmistusprosessin ja kuormituksen tyypin perusteella

- k = 1,0 rakenneosille, joissa reiät ovat sileitä (eli reiät, joissa ei ole lovia), esimerkiksi reiät, jotka on valmistettu poraamalla tai vesisuihkuleikkaamalla
- k = 0,9 rakenneosille, joissa reiät ovat karkeampia (eli reiät, joissa on lovia), esimerkiksi reiät, jotka on valmistettu lävistämällä tai polttoleikkaamalla kaasulla
- k = 0,9 rakenneosille, joihin kohdistuu väsytyskuormitus.

Kaava (5.24) oletetaan sisältyvän hiiliterästen standardiin EN 1993-1-1 sen seuraavassa revisiossa ja sen on osoitettu soveltuvan myös ruostumattomille teräksille. Standardin EN 1993-1-4 nykyisessä versiossa esitetään konservatiivisempi kaava, joka on peräisin standardista EN 1993-1-3:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \tag{5.25}$$

missä

$$k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0{,}3)] \tag{5.26}$$

missä:

r = [poikkileikkauksessa olevien ruuvien lukumäärä] / [ruuvien kokonaismäärä kiinnityksessä]

d_0 on ruuvin reiän nimellinen halkaisija

u $= 2e_2$ mutta $u \leq p_2$

e_2 kiinnittimen reiän keskiön ja viereisen rakenneosan reunan välinen reunaetäisyys mitattuna kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden

p_2 viereisten kiinnitinrivien välinen keskiöetäisyys mitattuna siirrettävää voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa.

5.7.3 Poikkileikkauksen puristuskestävyys

Poikkileikkauksen puristuskestävyys $N_{c,Rd}$, kun resultoiva voima vaikuttaa painopisteen kautta (poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3) tai tehollisen poikkileikkauksen painopisteen kautta (poikkileikkausluokka 4) voidaan laskea seuraavasti:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y/\gamma_{M0} \quad \text{poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3} \tag{5.27}$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y/\gamma_{M0} \quad \text{poikkileikkausluokka 4} \tag{5.28}$$

Huom.: Ei-kaksoissymmetriset poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvat poikkileikkaukset mitoitetaan kohdan 5.7.6 mukaan ottaen huomioon neutraaliakselin siirtymisestä aiheutuva lisämomentti, ks. kohta 5.4.1.

5.7.4 Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

Kun leikkausvoimaa ja aksiaalista voimaa ei ole, poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo yksiaksiaalisessa taivutuksessa $M_{c.Rd}$ lasketaan kaavoista:

$$M_{c,Rd} = W_{pl}\, f_y/\gamma_{M0} \qquad \text{poikkileikkausluokat 1 ja 2} \qquad (5.29)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min}\, f_y/\gamma_{M0} \qquad \text{poikkileikkausluokka 3} \qquad (5.30)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min}\, f_y/\gamma_{M0} \qquad \text{poikkileikkausluokka 4} \qquad (5.31)$$

missä:

W_{pl} on plastisuusteorian mukainen taivutusvastus

$W_{el,min}$ on kimmoteorian mukainen taivutusvastus laskettuna poikkileikkauksen kohtaan, jossa kimmoinen jännitys on maksimissaan (mutta ks. kohta 5.1 kylmämuovatut poikkileikkaukset)

$W_{eff,min}$ on tehollisen poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus laskettuna poikkileikkauksen kohtaan, jossa kimmoinen jännitys on maksimissaan (mutta ks kohta 5.1 kylmämuovatut poikkileikkaukset).

Kun taivutus vaikuttaa kahden akselin suhteen, ks kohta 5.7.6.

5.7.5 Poikkileikkauksen leikkauskestävyys

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys, $V_{pl,Rd}$ voidaan yleensä laskea kaavasta:

$$V_{pl,Rd} = \left(\frac{A_v\,(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}}\right) \qquad (5.32)$$

missä A_v on leikkauspinta-ala.

Taulukko 5.5 esitetään leikkauspinta-alan laskenta.

Taulukko 5.5 *Leikkauspinta-ala A_v eri poikkileikkauksille*

Poikkileikkaus	Leikkauspinta-ala A_v
Valssatut I ja H profiilit, kuormitus uuman suuntainen	$A - 2bt_\mathrm{f} + (t_\mathrm{w} + 2r)t_\mathrm{f}$ mutta enintään $\eta h_\mathrm{w} t_\mathrm{w}$
Valssatut U-profiilit, kuormitus uuman suuntainen	$A - 2bt_\mathrm{f} + (t_\mathrm{w} + r)\, t_\mathrm{f}$
Valssatut T-profiilit, kuormitus uuman suuntainen	$0{,}9(A - bt_\mathrm{f})$
Hitsatut I, H ja rakenneputket, kuormitus uuman suuntainen	$\eta\sum(h_\mathrm{w} t_\mathrm{w})$
Hitsatut I, H ja rakenneputket, kuormitus laippojen suuntainen	$A - \sum(h_\mathrm{w} t_\mathrm{w})$
Valssatut suorakulmaiset rakenneputket, sama seinämänpaksuus kaikilla sivuilla	kuormitus uuman suunnassa: $Ah/(b + h)$ kuormitus laipan suunnassa: $Ab/(b + h)$
Poikkileikkaukseltaan pyöreät rakenneputket, sama seinämänpaksuus poikkileikkauksessa	$2A/\pi$
Poikkileikkaukseltaan elliptinen rakenneputki, poikkileikkauksessa sama seinämänpaksuus, kuormitus poikkileikkauksen korkeuden suuntainen	$2(h - t)/t$
Poikkileikkaukseltaan elliptinen rakenneputki, poikkileikkauksessa sama seinämänpaksuus, kuormitus poikkileikkauksen leveyden suuntainen.	$2(b - t)/t$

missä:

A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala

b on kokonaisleveys

h on kokonaiskorkeus

h_w on uuman korkeus

r on pyöristyssäde

t_f on laipan aineenpaksuus

t_w on uuman aineenpaksuus (jos uuman aineenpaksuus ei ole vakio, t_w uuman aineenpaksuutena käytetään uuman minimi aineenpaksuutta).

η katso EN 1993-1-5. (EN 1993-1-4 suositusarvo on $\eta = 1{,}20$.)

Huom.: Samaa arvoa parametrille η käytetään laskettaessa leikkauslommahduskestävyyttä kuin on käytetty laskettaessa plastista leikkauskestävyyttä.

Leikkauslommahduskestävyys tarkistetaan kohdan 5.4.3 mukaan.

5.7.6 Poikkileikkaukset, joihin kohdistuu yhdistetty rasitus

Kun poikkileikkauksessa vaikuttaa aksiaalinen kuormitus, sen vaikutus otetaan huomioon laskettaessa plastinen momentti kestävyys. Poikkileikkausluokille 1 ja 2 seuraava ehto tarkistetaan:

$$M_{\mathrm{Ed}} \leq M_{\mathrm{N,Rd}} \tag{5.33}$$

missä $M_{\mathrm{N,Rd}}$ on plastinen momenttikestävyys, jonka arvossa on otettu huomioon aksiaalivoiman N_{Ed} aiheuttama vähennys.

Kaksoissymmetrisille I- ja H-profiileille tai muille laipallisille profiileille aksiaalikuormituksen vaikutusta plastiseen momenttikestävyyteen y-y-akselin suhteen ei oteta huomioon, mikäli molemmat seuraavista ehdoista toteutuvat:

$$N_{\mathrm{Ed}} \leq 0{,}25 N_{\mathrm{pl,Rd}} \tag{5.34}$$

$$N_{\mathrm{Ed}} \leq 0{,}5 h_{\mathrm{w}} t_{\mathrm{w}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}} \tag{5.35}$$

Kun poikkileikkausta ei kuormitusta leikkausvoima, poikkileikkausluokkien 3 ja 4 poikkileikkauksille suurin pituussuuntainen jännitys tarkistetaan ehdolla:

$$\sigma_{\mathrm{x,Ed}} \leq f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}} \tag{5.36}$$

missä:

$\sigma_{\mathrm{x,Ed}}$ on momentin ja aksiaalisen voiman aiheuttama pituussuuntaisen paikallisen jännityksen suunnitteluarvo, johon on otettu huomioon kiinnittimien reiät tarvittaessa.

Poikkileikkausluokan 4 poikkileikkauksille myös seuraavan ehdon toteutuminen tarkistetaan:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{A_{\mathrm{eff}}\, f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}} + \frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{Ny}}}{W_{\mathrm{eff,y,min}}\, f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}} + \frac{M_{\mathrm{z,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{Nz}}}{W_{\mathrm{eff,z,min}}\, f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}} \leq 1 \tag{5.37}$$

missä:

A_{eff} on tehollinen poikkileikkauspinta-ala puristuskuormalle

$W_{\mathrm{eff,y,min}}$ on poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus tarkasteltavan akselin suhteen taivutuskuormalle

e_{N} on poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtymä, joka aiheutuu ainoastaan puristuksesta.

Kulmateräksille edellisessä kaavassa y- ja z- akselien sijasta käytetään akseleita u ja v.

Kun V_{Ed} on enemmän kuin 50 % $V_{\mathrm{pl,Rd}}$, poikkileikkauksen kestävyys samanaikaisesti vaikuttavalle momentille ja aksiaaliselle voimalle lasketaan käyttäen leikkauspinta-alan osalle pienennettyä myötörajan arvoa (1 - ρ) f_{y}, missä $\rho = (2V_{\mathrm{Ed}} / V_{\mathrm{pl,Rd}} - 1)^2$.

6 SAUVOJEN MITOITUS

6.1 Yleistä

Ruostumattomista teräksistä tehtyjen rakenteiden mitoitus on samankaltainen kuin tavanomaisista rakenneteräksistä tehtyjen rakenteiden mitoitus. Rakenneosien voimien ja momenttien laskemiseksi suositellaan kimmoteoriaan perustuvan kokonaisanalyysin käyttöä.

Poikkileikkauskestävyyden lisäksi (ks. kohta 5) rakenneosat mitoitetaan stabiiliuden suhteen, jota tässä luvussa käsitellään.

Mahdollinen mitoitustapa nurjahduksen suhteen on lommahdusjännitystä vastaavan tangenttikimmokertoimen käyttöön perustuvan teorian käyttö sen sijaan, että käytetään alkukimmokerrointa kuten hiiliteräksillä. Olettamalla geometrisille epätäydellisyyksille ja alkujännityksille sama taso ruostumattomilla teräksillä ja hiiliteräksillä, johtaa tämän teorian käyttö yleensä tyydyttäviin tuloksiin, kun tuloksia verrataan hiiliteräksestä tehdyillä rakenneosalla tehtyihin kokeisiin. Tämän perusteella tätä teoriaa voidaan käyttää mitoituksessa. Menetelmä vaatii kuitenkin iteratiivisia laskelmia ja sen takia menetelmän käyttöä vältetään tässä käsikirjassa lukuun ottamatta joitakin tapauksia, jossa menetelmää on käytetty sellaisten mitoituskäyrien laatimiseksi, joita käytetään yhdessä alkukimmokertoimen kanssa. Tässä käsikirjassa esitetyt mitoitusmenetelmät on kalibroitu olemassa olevien koetulosten avulla.

Seuraavissa alakohdissa esitetyt ohjeet soveltuvat yhden tai kahden akselin suhteen symmetrisille sekä pistesymmetrisille profiileille, joiden poikkileikkaus sauvan akselin suunnassa on vakio. Poikkileikkaukseltaan epäsymmetriset sauvat tulee mitoittaa kokeellisesti.

6.2 Vedetyt sauvat

Keskeisesti vedettyjen sauvojen vetokestävyys voidaan laskea pelkästään poikkileikkauskestävyyden perusteella, ks. kohta 5.7.2. Vedettyjen sauvojen kiinnitysten ja liitosten mitoitus, ks. kohta 7.

Yhdestä kyljestä kiinnitettyjen kulmaterästen ja muiden vastaavien epäsymmetristen kiinnitysten vetokestävyys lasketaan kaavasta:

$$N_{\mathrm{t,Rd}} = N_{\mathrm{pl,Rd}} \leq N_{\mathrm{u,Rd}} \tag{6.1}$$

missä suureet ovat kohdan 5.7.2 mukaisia ja $N_{u,Rd}$ lasketaan kohdan 7.2.3 mukaisesti.

6.3 Puristetut sauvat

6.3.1 Yleistä

Puristetut sauvat voivat menettää stabiiliutensa monella tavalla, kuten:

- Levyn lommahdus (vain poikkileikkausluokassa 4)
- Taivutusnurjahdus
- Vääntönurjahdus
- Taivutusvääntönurjahdus.

Kaksoissymmetriset profiilit (CHS, RHS, SHS, I- profiilit, jne.)

Kaksoissymmetrisiä profiileja ei tarvitse mitoittaa taivutus-vääntönurjahdukselle, koska poikkileikkauksen leikkauskeskiö yhtyy painopisteeseen. Vääntönurjahdus voi olla kriittinen.

Pyöreät ja neliön muotoiset rakenneputket eivät ole alttiita vääntönurjahdukselle.

Rakentamisessa tyypillisesti käytettäville suorakaiteen muotoisille rakenneputkille vääntönurjahdus ei ole kriittinen. Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vääntönurjahdus on kriittinen vain, jos rakenneputken *h/b*-suhde on epätavallisen suuri.

Yhden akselin suhteen symmetriset profiilit (tasakylkiset kulmateräkset, U-teräkset, jne.)

Yhden akselin suhteen symmetriset profiilit kuten C-profiilit ja tasakylkiset kulmateräkset tarkistetaan taivutusvääntönurjahdukselle, koska poikkileikkauksen painopiste ja leikkauskeskiö eivät yhdy.

Pistesymmetriset profiilit (Z-profiilit, ristin muotoiset profiilit, jne.)

Näille profiileille vääntönurjahdus voi olla kriittinen.

6.3.2 Levyn lommahdus

Poikkileikkausluokassa 4 levyn lommahdus otetaan huomioon tekijän β_A avulla, joka tarkoittaa poikkileikkauksen tehollisen ja bruttopinta-alan suhdetta. Neutraaliakselin siirtymisestä aiheutuva taivutusmomentin lisä on epäsymmetrinen eli erilainen eri akseleiden suhteen. Poikkileikkausluokan 4 rakenneosat käsitellään kohdan 5.5 mukaan.

6.3.3 Taivutusnurjahdus

Taivutusnurjahduskestävyys lasketaan kaavasta:

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \chi\, A\, f_{\mathrm{y}} \,/\, \gamma_{\mathrm{M1}} \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \qquad (6.2)$$

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \chi\, A_{\mathrm{eff}}\, f_{\mathrm{y}} \,/\, \gamma_{\mathrm{M1}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \qquad (6.3)$$

missä:

- A on bruttopinta-ala
- A_{eff} on poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvan poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala
- χ on nurjahduksen huomioonottava pienennystekijä, joka lasketaan kaavasta:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \qquad (6.4)$$

missä:

$$\phi = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \qquad (6.5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} = \frac{L_{\mathrm{cr}}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{f_{\mathrm{y}}}{E}} \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \qquad (6.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} = \frac{L_{\mathrm{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y \frac{A_{\mathrm{eff}}}{A}}{E}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \tag{6.7}$$

missä:

α on taulukon 6.1 mukainen epätäydellisyystekijä

N_{cr} kimmoteorian mukainen bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu kriittinen voima kyseeseen tulevassa nurjahdusmuodossa

$\bar{\lambda}_0$ on taulukon 6.1 mukainen rajahoikkuus

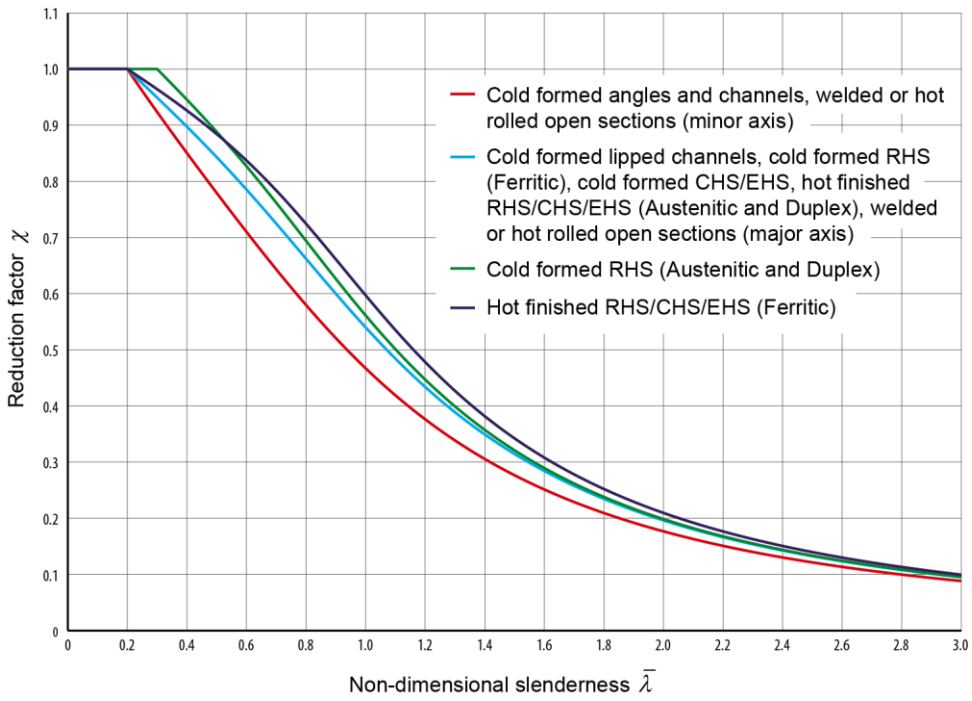
L_{cr} on nurjahduspituus tarkasteltavassa tasossa. Nurjahduspituus määritetään rakenteiden mekaniikan periaatteiden mukaisesti ottaen reunaehdot huomioon.

i on bruttopoikkileikkauksen mittojen perusteella määritetty hitaussäde.

Taulukko 6.1 *α:n ja $\bar{\lambda}_0$:n arvot taivutusnurjahdukselle*

Sauvan tyyppi	Nurjahdussuunta	Austeniittinen ja duplex		Ferriittinen	
		α	$\bar{\lambda}_0$	α	$\bar{\lambda}_0$
Kylmämuovatut L- ja U-profiilit	Kaikki	0,76	0,2	0,76	0,2
Kylmämuovatutu jäykistetyt U-profiilit	Kaikki	0,49	0,2	0,49	0,2
Kylmämuovattu RHS	Kaikki	0,49	0,3	0,49	0,2
Kylmämuovattu CHS/ EHS	Kaikki	0,49	0,2	0,49	0,2
Kuumamuovatut RHS	Kaikki	0,49	0,2	0,34	0,2
Kuumamuovatut CHS/EHS	Kaikki	0,49	0,2	0,34	0,2
Hitsatut avoprofiilit	Suurempi pääjäyhyysakseli	0,49	0,2	0,49	0,2
	Pienempi pääjäyhyysakseli	0,76	0,2	0,76	0,2

Kuvassa 6.1 esitetään nurjahduskäyrät.



Kuva 6.1 *Nurjahduskäyrät taivutusnurjahdukselle*

Nurjahduksen vaikutus voidaan jättää huomioon ottamatta ja tarkistaa ainoastaan sauvan poikkileikkauskestävyys jos:

$$\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad \text{or} \quad \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr}}} \leq \bar{\lambda}_0{}^2$$

Kuvassa 6.1 ja taulukossa 6.1 esitetyt nurjahduskäyrät ovat hieman enemmän konservatiivisia kuin standardissa EN 1993-1-4 esitetyt vastaavat nurjahduskäyrät (arvot parametreille α ja $\bar{\lambda}_0$ on annettu alla taulukossa 6.2) Tutkimustulokset viimeisen kymmenen vuoden ajalta osoittavat, että standardin EN 1993-1-4 nurjahduskäyrät kylmämuovatuille avoprofiileille ja kylmämuovatuille rakenneputkille ovat hieman optimistisia, ja ferriittisten ruostumattomien kylmämuovattujen rakenneputkien sekä vastaavien austeniittisten ja duplex ruostumattomien rakenneputkien välillä on eroa nurjahduskäyttäytymisessä. On oletettavaa, että standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa nurjahduskäyrät annetaan kuvan 6.1 ja taulukon 6.1 mukaisesti.

Taulukko 6.2 *Arvot tekijöille α ja $\bar{\lambda}_0$ taivutus- ja vääntövääntönurjahdukselle standardin EN 1993-1-4 mukaisesti*

Nurjahdusmuoto	Sauvan muoto	α	$\bar{\lambda}_0$
Taivutus	Kylmämuovatut avoprofiilit	0,49	0,40
	Rakenneputket (hitsatut ja saumattomat)	0,49	0,40
	Hitsatut avoprofiilit (vahvempi suunta)	0,49	0,20
	Hitsatut avoprofiilit (heikompi suunta)	0,76	0,20
Arvot tekijöille α ja $\bar{\lambda}_0$ eivät ole voimassa rakenneputkille, jotka hehkutetaan valmistuksen jälkeen (joka on hyvin harvinaista).			

6.3.4 Vääntö- ja taivutusvääntönurjahdus

Kestävyydet lasketaan kohdan 6.3.3 mukaan korvaamalla termi $\bar{\lambda}$ suuremmalla arvoista $\bar{\lambda}_T$ ja $\bar{\lambda}_{TF}$ (ks. kaavat (6.8) ja (6.9)) sekä valitsemalla α = 0,34 ja $\bar{\lambda}_0$ = 0,2.

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{A\, f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \tag{6.8}$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}}\, f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \tag{6.9}$$

missä:

$N_{\mathrm{cr}} = N_{\mathrm{cr,TF}}$ ja $N_{\mathrm{cr}} < N_{\mathrm{cr,T}}$

missä:

$N_{\mathrm{cr,T}}$ on kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma vääntönurjahdukselle:

$$N_{\mathrm{cr,T}} = \frac{1}{i_{\mathrm{o}}^2}\left(GI_{\mathrm{t}} + \frac{\pi^2 E I_{\mathrm{w}}}{l_{\mathrm{T}}^2}\right) \tag{6.10}$$

$N_{\mathrm{cr,TF}}$ on kimmoteorian mukainen taivutusvääntönurjahduskuorma. y-y akselin suhteen symmetrisille poikkileikkauksille (eli $z_{\mathrm{o}} = 0$):

$$N_{\mathrm{cr,TF}} = \frac{N_{\mathrm{cr,y}}}{2\beta}\left[1 + \frac{N_{\mathrm{cr,T}}}{N_{\mathrm{cr,y}}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{\mathrm{cr,T}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}\right)^2 + 4\left(\frac{y_o}{i_o}\right)^2 \frac{N_{\mathrm{cr,T}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}}\right] \tag{6.11}$$

missä:

$$i_{\mathrm{o}}^2 = i_{\mathrm{y}}^2 + i_{\mathrm{z}}^2 + y_{\mathrm{o}}^2 + z_{\mathrm{o}}^2 \tag{6.12}$$

i_{y} ja i_{z} on hitaussäde kyseeseen tulevan akselin (y- ja z-akseli) suhteen laskettuna brutto poikkileikkauksien ominaisuuksien mukaan

y_{o} ja z_{o} ovat leikkauskeskiön koordinaatit bruttopoikkileikkauksen keskiön suhteen

G on liukukerroin

l_{T} sauvan nurjahduspituus vääntönurjahduksessa (katso EN 1993-1-3)

I_{T} on bruttopoikkileikkauksen vääntövakio

I_{W} bruttopoikkileikkauksen käyristymisjäyhyys

$\beta = 1 - \left(\frac{y_{\mathrm{o}}}{i_{\mathrm{o}}}\right)^2$

$N_{\mathrm{cr,y}}\ ja\ N_{\mathrm{cr,z}}$ ovat kimmoteorian mukaisia bruttopoikkileikkauksen mukaan lasketut kriittiset voimat taivutusnurjahdukselle tarkasteltavassa tasossa ($y - y$ ja $z - z$ akselin suhteen).

Kulmateräksille edellisissä kaavoissa y- ja z- akselien sijasta käytetään akseleita u ja v.

6.4 Taivutetut sauvat

6.4.1 Yleistä

Sauvan sanotaan olevan yksinkertaisesti taivutettu, kun kuormat vaikuttavat kohtisuoraan sauvan pituusakselin suhteen ja sauvan päät on kiinnitetty siten, että tuille ei synny vääntöä, vetoa tai puristusta

Palkin taivutuskestävyyttä laskettaessa otetaan huomioon seuraavat kriteerit:

- Poikkileikkauksen myötääminen (ks. Kohta 5.7)
- Puristetun levyn lommahdus (vain poikkileikkausluokassa 4, ks. kohta 5.7)
- Kiepahdus (ks. kohta 6.4.2)
- Leikkauslommahdus (ks. kohta 6.4.3)
- Pistekuormakestävyys tukien ja kuormien kohdalla (ks. kohta 6.4.4).

Leikkausviipeen ja laipan taipumisen vaikutukset taivutetuissa sauvoissa otetaan tarvittaessa huomioon kohtien 5.4.2 ja 5.4.3 mukaan

Kaksiaksiaalinen taivutus otetaan huomioon kohdan 6.5.2.

6.4.2 Kiepahdus

Vahvemman pääjäyhyysakselin suhteen taivutettu sivusuunnassa tukematon sauva mitoitetaan kiepahduksen suhteen. Kiepahdus voidaan jättää ottamatta huomioon ja tarkistaa ainoastaan sauvan poikkileikkauskestävyys seuraavissa tapauksissa:

- Taivutus tapahtuu vain heikomman akselin suhteen
- Taivutettu sauva on tuettu tehokkaasti sivusuunnassa koko matkalta
- Palkeille joille muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} \leq 0{,}4 \;\; tai \;\; \frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{cr}}} \leq 0{,}16$
- Lisäksi tietyille profiileille, kuten poikkileikkaukseltaan neliönmuotoiset tai ympyrämäiset rakenneputket, jotka eivät ole herkkiä kiepahdukselle.

Kaikissa muissa tapauksissa kiepahduskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$M_{\mathrm{b,Rd}} = \chi_{\mathrm{LT}}\, W_{\mathrm{y}}\, f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}} \tag{6.13}$$

missä:

$W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{pl,y}}$ poikkileikkausluokissa 1 ja 2

$W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{el,y}}$ poikkileikkausluokassa 3

$W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{eff,y}}$ poikkileikkausluokassa 4

χ_{LT} on kiepahduksen huomioon ottava pienennystekijä, joka lasketaan kaavasta

missä:

$$\chi_{\mathrm{LT}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{LT}} + [\phi_{\mathrm{LT}}{}^{2} - \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^{2}]^{0,5}} \leq 1 \tag{6.14}$$

$$\phi_{\mathrm{LT}} = 0{,}5\left(1 + \alpha_{\mathrm{LT}}(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} - 0{,}4) + \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^{2}\right) \tag{6.15}$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\mathrm{y}}\, f_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{cr}}}} \tag{6.16}$$

α_{LT} on epätäydellisyystekijä

= 0,34 kylmämuovatuille profiileille ja rakenneputkille (hitsatuille ja saumattomille)

= 0,76 hitsatuille avoimille profiileille ja muille profiileille, joille testituloksia ei ole saatavilla.

M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa (ks. Liite E).

Kulmateräksille y- ja z-akselien sijasta käytetään u- ja v-akseleita em. kaavoja käytettäessä.

Kiepahduskäyrät esitetään kuvassa 6.2.

Taivutusmomentin jakautuminen sauvan sivuttaistukien välillä otetaan huomioon käyttämällä muunnettua arvoa tekijälle χ_{LT} :

$$\chi_{\mathrm{LT,mod}} = \frac{\chi_{\mathrm{LT}}}{f} \quad \text{mutta } \chi_{\mathrm{LT,mod}} \leq 1{,}0 \quad \text{ja} \quad \chi_{\mathrm{LT,mod}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^{2}} \tag{6.17}$$

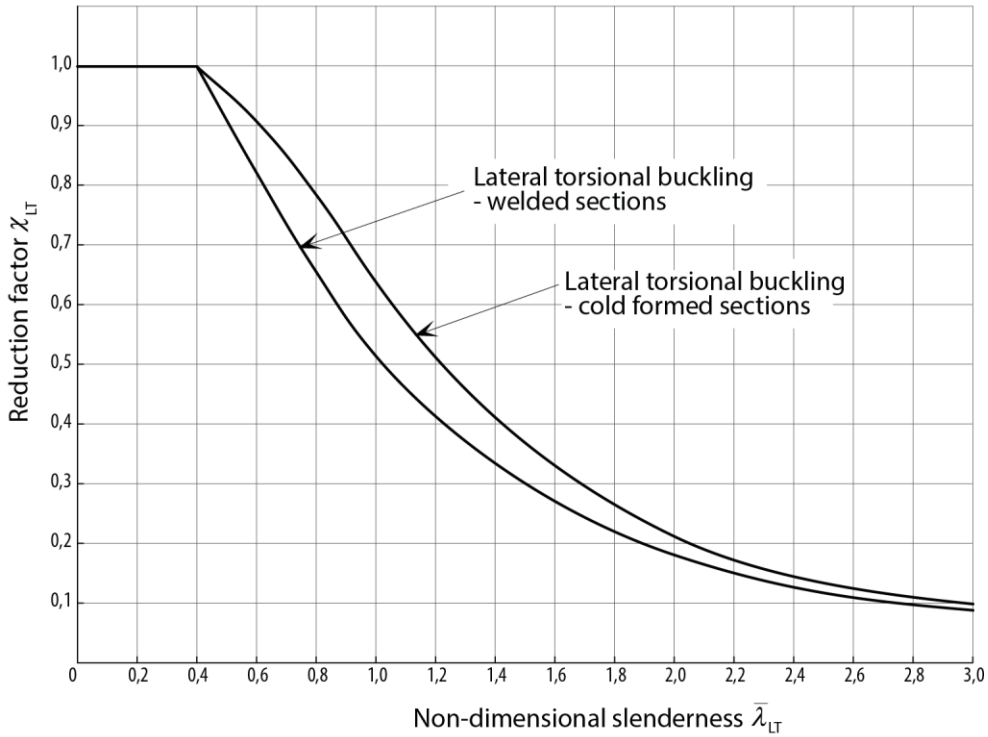
missä tekijän f minimi arvoksi suositellaan:

$$f = 1 - 0{,}5(1 - k_{\mathrm{c}})\left[1 - 2{,}0(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} - 0{,}8)^{2}\right] \quad \text{mutta } f \leq 1{,}0 \tag{6.18}$$

ja

$$k_{\mathrm{c}} = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \tag{6.19}$$

Arvot tekijälle C_1 annetaan liitteessä E.



Kuva 6.2 *Kiepahduskäyrät*

6.4.3 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyys määräytyy joko poikkileikkauksen myötäämisen (ks. kohta 5.7.5) tai leikkauslommahduksen perusteella.

Leikkauslommahduskestävyys tarkistetaan vain kun:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56{,}2\varepsilon}{\eta} \qquad \text{jäykistämättömälle uumalle} \tag{6.20}$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24{,}3\varepsilon\sqrt{k_\tau}}{\eta} \qquad \text{jäykistetylle uumalle} \tag{6.21}$$

Palkille leikkauslommahduskestävyys lasketaan kaavasta:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw}\, h_w\, t}{\sqrt{3}\ \gamma_{M1}} \tag{6.22}$$

missä uuman osuus lasketaan kaavasta:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw}\, h_w\, t}{\sqrt{3}\ \gamma_{M1}} \tag{6.23}$$

missä:

h_w on laippojen sisäpintojen väli (katso. kuva 6.3)

ε on määritelty taulukossa 5.2

k_τ on leikkauslommahduskerroin

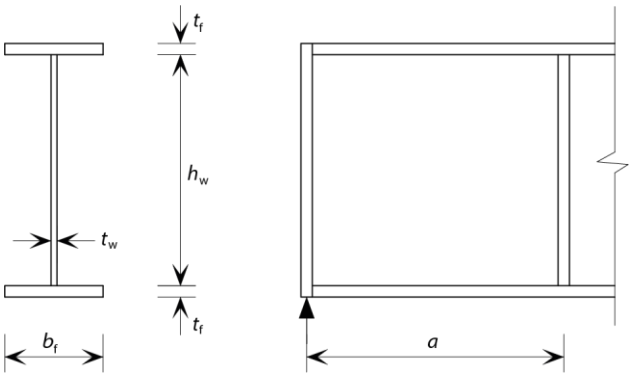
$V_{bw,Rd}$ on uuman osuus leikkauslommahduskestävyyteen

$V_{\mathrm{bf,Rd}}$ on laipan osuus leikkauslommahduskestävyyteen

f_{yw} on uuman materiaalin myötörajan ominaisarvo

η ks. EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 suositusarvo $\eta = 1{,}20$) ja NA SFS-EN 1993-1-4.

Huom.: Samaa arvoa parametrille η käytetään laskettaessa plastista leikkauskestävyyttä kuin on käytetty laskettaessa leikkauslommahduskestävyyttä.



Kuva 6.3 *Geometristen mittojen merkinnät*

Uumille, joilla poikittaiset jäykisteet ainoastaan tukien kohdalla, ja uumille, joilla poikittaiset ja/tai pitkittäiset välijäykisteet, uuman vaikutus tekijään χ_{w} annetaan taulukossa 6.3.

Taulukko 6.3 *Uuman leikkauslommahduksen reduktiokerroin χ_w*

	χ_{w} kun jäykkä päätyjäykiste	χ_{w} kun ei-jäykkä päätyjäykiste
$\bar{\lambda}_{\mathrm{w}} \leq \frac{0{,}65}{\eta}$	η	η
$\frac{0{,}65}{\eta} < \bar{\lambda}_{\mathrm{w}} < 0{,}65$	$\frac{0{,}65}{\bar{\lambda}_{\mathrm{w}}}$	$\frac{0{,}65}{\bar{\lambda}_{\mathrm{w}}}$
$\bar{\lambda}_{\mathrm{w}} \geq 0{,}65$	$\frac{1{,}56}{(0{,}91 + \bar{\lambda}_{\mathrm{w}})}$	$\frac{1{,}19}{(0{,}54 + \bar{\lambda}_{w})}$

Kun pystysuuntaiset uumajäykisteet ovat vain tukien kohdalla, hoikkuus $\bar{\lambda}_{\mathrm{w}}$ lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{w}} = \left(\frac{h_{\mathrm{w}}}{86{,}4\, t_{\mathrm{w}}\, \varepsilon}\right) \tag{6.24}$$

Tapauksissa, joissa pystysuuntaiset uumajäykisteet ovat tukien kohdilla ja palkin uumassa käytetään pysty- ja/tai pituussuuntaisia välijäykisteitä, hoikkuus $\bar{\lambda}_{\mathrm{w}}$ lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{w}} = \left(\frac{h_{\mathrm{w}}}{37{,}4 t_{\mathrm{w}}\, \varepsilon \sqrt{k_{\tau}}}\right) \tag{6.25}$$

missä k_{τ} on jäykisteiden (laipat ja uuman pystysuuntaiset jäykisteet) rajoittaman uuman osan pienin lommahduskerroin. Uumat, joissa on jäykät pystyjäykisteet

ilman pituussuuntaisia jäykisteitä tai enemmän kuin kaksi pituussuuntaista jäykistettä, k_τ :

$$k_\tau = 5{,}34 + 4{,}00(h_\mathrm{w}/a)^2 + k_\mathrm{\tau st} \qquad \text{kun } a/h_\mathrm{w} \geq 1 \tag{6.26}$$

$$k_\tau = 4{,}00 + 5{,}34(h_\mathrm{w}/a)^2 + k_\mathrm{\tau st} \qquad \text{kun } a/h_\mathrm{w} < 1 \tag{6.27}$$

missä:

$$k_\mathrm{\tau st} = 9(h_\mathrm{w}/a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_\mathrm{sl}}{t^3 h_\mathrm{w}}\right)^3} \qquad \text{kuitenkin vähintään} \qquad \frac{2{,}1}{t}\sqrt[3]{\frac{I_\mathrm{sl}}{h_\mathrm{w}}} \tag{6.28}$$

missä

a on pystyjäykisteiden keskilinjojen välinen etäisyys, katso kuva 6.3.

I_sl on pituussuuntaisen jäykisteen hitausmomentti z-z akselin suhteen.

Kaavoja (6.26) ja (6.27) käytetään myös levykentille, joissa yksi tai kaksi pituusjäykistettä, jos levykentän sivusuhde $a/h_\mathrm{w} \geq 3$. Levykenttien osalta, joissa yksi tai kaksi pituusjäykistettä ja joiden levykentän sivusuhde $a/h_\mathrm{w} < 3$, noudatetaan standardin EN 1993-1-5 liitettä A3.

Yksinkertaisuuden vuoksi laippojen osuus χ_f voidaan jättää huomioon ottamatta. Jos laipan kestävyyttä ei täysin hyödynnetä taivutuskestävyyttä laskettaessa ($M_\mathrm{Ed} < M_\mathrm{f,Rd}$) voidaan laippojen suhteellinen osuus määrittää seuraavasti:

$$V_\mathrm{bf,Rd} = \frac{b_\mathrm{f}\, t_\mathrm{f}^2\, f_\mathrm{yf}}{c\, \gamma_\mathrm{M1}}\left[1 - \left(\frac{M_\mathrm{Ed}}{M_\mathrm{f,Rd}}\right)^2\right] \tag{6.29}$$

missä:

b_f ja t_f valitaan sen laipan mukaan, joka antaa pienimmän aksiaalisen kestävyyden, b_f saa olla enintään $15\varepsilon t_\mathrm{f}$ uuman molemmilla puolin

$M_\mathrm{f,Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon, $M_\mathrm{f,Rd} = M_\mathrm{f,k}/\gamma_\mathrm{M0}$

$$c = a\left(0{,}17 + \frac{3{,}5 b_\mathrm{f}\, t_\mathrm{f}^2\, f_\mathrm{yf}}{t_\mathrm{w}\, h_\mathrm{w}^2 f_\mathrm{yw}}\right) \qquad \text{ja} \qquad \frac{c}{a} \leq 0{,}65 \tag{6.30}$$

f_yf on laipan myötörajan ominaisarvo.

Jos aksiaalinen voima N_Ed vaikuttaa, $M_\mathrm{f,Rd}$:n arvoa pienennetään kertomalla se tekijällä:

$$\left[1 - \frac{N_\mathrm{Ed}}{\dfrac{(A_\mathrm{f1} + A_\mathrm{f2}) f_\mathrm{yf}}{\gamma_\mathrm{M0}}}\right] \tag{6.31}$$

missä A_f1 ja A_f2 tarkoittavat ylä- ja alalaippojen pinta-aloja.

Todentaminen tehdään seuraavasti:

$$\eta_3 = \frac{V_{\mathrm{Ed}}}{V_{\mathrm{b,Rd}}} \leq 1{,}0 \tag{6.32}$$

missä:

V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo väännöstä aiheutuva leikkaus mukaanlukien.

Sauvan kestävyyden todentaminen kahdensuuntaiselle taivutukselle ja aksiaalisuuntaiselle puristukselle suoritetaan seuraavalla kaavalla:

$$\eta_1 = \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{f_{\mathrm{y}}\, A_{\mathrm{eff}}/\gamma_{\mathrm{M0}}} + \frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{y,N}}}{f_{\mathrm{y}}\, W_{\mathrm{y,eff}}/\gamma_{\mathrm{M0}}} + \frac{M_{\mathrm{z,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{z,N}}}{f_{\mathrm{y}}\, W_{\mathrm{z,eff}}/\gamma_{\mathrm{M0}}} \leq 1{,}0 \tag{6.33}$$

missä:

A_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala (kohta 5.4.1)

$e_{\mathrm{y,N}}$ on neutraaliakselin siirtyminen y-akselin suuntaan (kohta 5.4.1)

$e_{\mathrm{z,N}}$ on neutraaliakselin siirtyminen z-akselin suuntaan (kohta 5.4.1)

$M_{\mathrm{y,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitusarvo y akselin suuntaan

$M_{\mathrm{z,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitusarvo z akselin suuntaan

N_{Ed} on aksiaalisen voiman mitoitusarvo

$W_{\mathrm{y,eff}}$ on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus y akselin suuntaan (kohta 5.4.1)

$W_{\mathrm{z,eff}}$ on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus z akselin suuntaan (kohta 5.4.1).

Voimasuureisiin M_{Ed} ja N_{Ed} sisältyy myös toisen kertaluvun kokonaisvaikutukset, kun niillä on merkitystä. Levyn lommahdus levykentälle määritetään jännityksillä, jotka sijaitsevat etäisyyksillä $0{,}4a$ tai $0{,}5b$, kumpi näistä on pienempi, levykentän päädystä, jossa jännitykset ovat suurimmat.

Edellyttäen, että leikkauskestävyyden hyödyntämisaste $\eta_3 \leq 0{,}5$, taivutusmomentti-kestävyyttä ja kestävyyttä aksiaalisen voiman suhteen ei tarvitse leikkausvoiman takia pienentää. Mikäli $\bar{\eta}_3 > 0{,}5$ taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksen I- tai kotelopalkin uumassa tulee täyttää ehto:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{\mathrm{f,Rd}}}{M_{\mathrm{pl,Rd}}}\right)(2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1{,}0 \qquad \text{kun} \qquad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{\mathrm{f,Rd}}}{M_{\mathrm{pl,Rd}}} \tag{6.34}$$

missä:

$M_{\mathrm{f,Rd}}$ on laippojen tehollisen alan plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys

$M_{\mathrm{pl,Rd}}$ on laippojen tehollisen alan ja täysin tehollisen uuman muodostaman poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys poikkileikkausluokasta riippumatta.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{pl,Rd}}} \tag{6.35}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{\mathrm{Ed}}}{V_{\mathrm{bw,Rd}}} \tag{6.36}$$

Jännitykset ovat etumerkiltään positiivisia. Suunnitteluarvot M_{Ed} ja V_{Ed} sisältävät toisen kertaluokan vaikutukset, kun niillä on vaikutusta.

Kaavan (6.34) mukaisen ehdon tulee olla voimassa kaikissa poikkileikkauksissa, mutta ehtoa ei tarvitse tarkistaa poikkileikkauksissa, jotka ovat enintään $h_w/2$ etäisyydellä välituista.

Jos aksiaalinen voima N_{Ed} vaikuttaa, $M_{\mathrm{pl,\,Rd}}$ korvataan EN 1993-1-1:n kohdan 6.2.9 mukaisella pienennetyllä plastisuusteorian mukaisella taivutuskestävyydellä $M_{\mathrm{N,\,Rd}}$. $M_{\mathrm{N,Rd}}$ ja $M_{\mathrm{f,\,Rd}}$:n arvoa pienennetään kaavan (6.31) mukaan. Jos aksiaalinen voima on niin suuri, että koko uuma on puristettu, sovelletaan EN 1993-1-5:n ohjeita.

6.4.4 Uuman paikallinen murtuminen, uuman paikallinen lommahtaminen ja uuman kokonaislommahdus pistekuormasta

Jäykistämättömän uuman kestävyys pistekuormille tai tukireaktioille määräytyy jonkin seuraavan kolmen mahdollisen murtumismuodon perusteella edellyttäen, että laipat on tuettu poikittaisessa suunnassa:

- uuman paikallinen murtuminen laipan lähellä, johon liittyy laipan plastinen muodonmuutos;
- uuman paikallinen lommahtaminen ja murtuminen laipan lähellä, johon liittyy laipan plastinen muodonmuutos;
- Sauvan koko uuman lommahtaminen.

Kylmämuovatuille profiileille voidaan käyttää EN 1993-1-3:n mukaisia ohjeita.

Valssatuille ja hitsatuille profiileille sovelletaan seuraavaa menetelmää, joka perustuu EN 1993-1-5: een.

Vaikuttavan pistekuorman mitoitusarvo F_{Sd} ei saa ylittää vastaavaa kestävyyttä, joka lasketaan kaavasta:

$$F_{\mathrm{Rd}} = f_{\mathrm{yw}}\, L_{\mathrm{eff}}\, t_{\mathrm{w}}/\gamma_{\mathrm{M1}} \tag{6.37}$$

missä:

t_{w} on uuman aineenpaksuus

f_{yw} on uuman myötölujuus

L_{eff} on tehollinen pituus kestävyyden laskemiseksi poikittaisille pistekuormille, joka määritetään $L_{\mathrm{eff}} = \chi_{\mathrm{F}}\, l_{\mathrm{y}}$

missä:

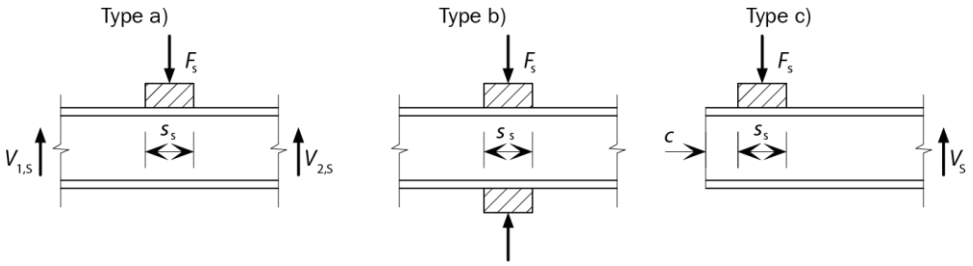
l_y on tehollinen kuormituspituus, johon vaikuttaa jäykän tukipinnan pituus s_{s}

χ_{F} on paikallisen lommahduksen pienennyskerroin.

Lisäksi otetaan huomioon poikittaisen voiman vaikutus sauvan taivutuskestävyyteen.

L_{eff}:n laskemiseksi erotellaan kolme kuormitustyyppiä seuraavasti:

- Voimat vaikuttavat yhden laipan kautta ja niitä vastustavat uuman leikkausvoimat (Kuva 6.4a)
- Voimat vaikuttavat yhteen laippaan ja ne siirtyvät uuman kautta suoraan toiseen laippaan (Kuva 6.4b)
- Voimat vaikuttavat yhden laipan kautta lähellä sauvan jäykistämätöntä päätä (Kuva 6.4c)



$$k_F = 6 + 2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 \qquad k_F = 3{,}5 + 2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 \qquad k_F = 2 + 6\left[\frac{s_s + c}{h_w}\right] \leq 6$$

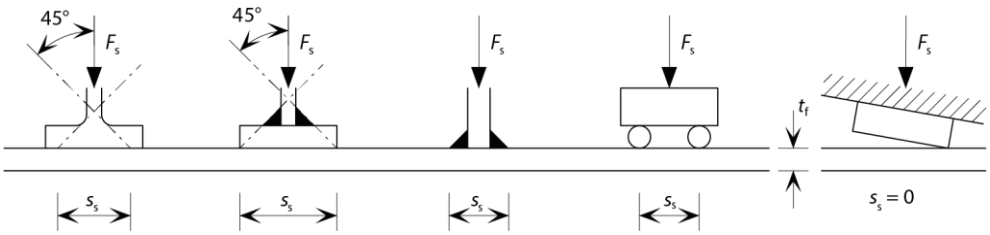
Kuva 6.4 *Lommahduskertoimet eri kuormitustapauksille*

Jäykän tukipinnan pituus

Laipan jäykän tukipinnan pituus s_s tarkoittaa leveyttä, jolla pituudella vaikuttava voima jakaantuu tehollisesti ja se voidaan määrittää olettamalla, että vaikuttava voima jakaantuu kaltevuudessa 1:1 ehjän teräksen läpi, ks. kuva 6.5. s_s saa olla enintään h_w:n suuruinen.

Jos useita pistekuormia on lähellä toisiaan, kestävyys tarkastetaan jokaiselle kuormalle erikseen sekä kokonaiskuormalle, jolloin s_s:n arvoksi valitaan äärimmäisten pistekuormien keskilinjojen välinen etäisyys.

.



Kuva 6.5 *Jäykän tukipinnan pituus*

Tehollinen kuormituspituus

Tehollinen kuormituspituus l_y lasketaan kahden dimensiottoman parametrin m_1 ja m_2 avulla seuraavasti:

$$m_1 = \frac{f_{\mathrm{yf}}\, b_{\mathrm{f}}}{f_{\mathrm{yw}}\, t_{\mathrm{w}}} \tag{6.38}$$

$$m_2 = 0{,}02\left(\frac{h_{\mathrm{w}}}{t_{\mathrm{f}}}\right)^2 \qquad \text{kun } \bar{\lambda}_{\mathrm{F}} > 0{,}5 \tag{6.39}$$

$$m_2 = 0 \qquad \text{kun } \bar{\lambda}_{\mathrm{F}} \leq 0{,}5 \tag{6.40}$$

Kuvan 6.4 tapauksissa a) ja b), l_y lasketaan seuraavasti

$$l_{\mathrm{y}} = s_{\mathrm{s}} + 2t_{\mathrm{f}}(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \tag{6.41}$$

mutta l_{y} ei saa olla kahden vierekkäisen jäykisteen välistä etäisyyttä suurempi

Tapaukselle c) l_{y} on pienin kaavojen (6.42) and (6.43). Jos voiman siirtävä rakenneosa ei liity tasaisesti sauvaan (ks. kuvan 6.5 oikeanpuoleisin tapaus), s_{s}:n arvoksi kaavassa 6.44 valitaan nolla.

$$l_{\mathrm{y}} = l_{\mathrm{e}} + t_{\mathrm{f}}\left[\sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_{\mathrm{e}}}{t_{\mathrm{f}}}\right)^2 + m_2}\right] \tag{6.42}$$

$$l_{\mathrm{y}} = l_{\mathrm{e}} + t_{\mathrm{f}}\sqrt{m_1 + m_2} \tag{6.43}$$

missä l_{e} lasketaan kaavasta:

$$l_{\mathrm{e}} = \frac{k_{\mathrm{F}}\, E\, t_{\mathrm{w}}^2}{2\, f_{\mathrm{yw}}\, h_{\mathrm{w}}} \;\leq\; s_{\mathrm{s}} + c \tag{6.44}$$

Tehollinen pituus kestävyyden laskemiseksi

Tehollinen pituus kestävyyden määrittämiseksi lasketaan kaavasta:

missä:

$$L_{\mathrm{eff}} = \chi_{\mathrm{F}}\, l_{\mathrm{y}} \tag{6.45}$$

missä:

$$\chi_{\mathrm{F}} = \frac{0{,}5}{\bar{\lambda}_{\mathrm{F}}} \leq 1.0 \tag{6.46}$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{F}} = \sqrt{\frac{l_{\mathrm{y}}\, t_{\mathrm{w}}\, f_{\mathrm{yw}}}{F_{\mathrm{cr}}}} \tag{6.47}$$

$$F_{\mathrm{cr}} = 0{,}9 k_{\mathrm{F}} E\, \frac{t_{\mathrm{w}}^3}{h_{\mathrm{w}}} \tag{6.48}$$

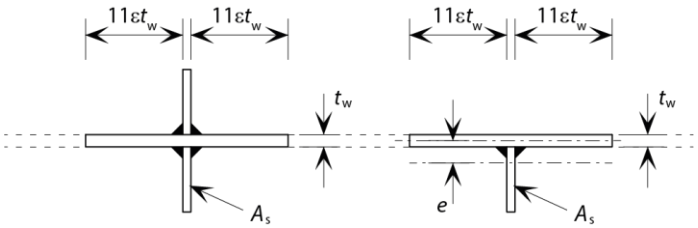
k_{F} on kuormitustapauksesta riippuva lommahduskerroin (ks. kuva 6.4).

On huomioitava, että laskettaessa arvoa suureelle m_2, on tehtävä alkuarvaus suureelle $\bar{\lambda}_F$. Kun suureen $\bar{\lambda}_F$ arvo on laskettu, suureen m_2 arvo voidaan laskea uudelleen.

6.4.5 Poikittaisjäykisteet

Tukien ja suurten pistekuormien kohdalla olevien pystyjäykisteiden tulisi mieluummin olla kaksipuolisia ja symmetrisiä uuman keskilinjan suhteen. Nämä jäykisteet mitoitetaan paikalliselle myötäämiselle ja lommahdukselle. Uuman välijäykisteet, joihin ei kohdistu ulkoisia poikittaisia voimia tarkistetaan nurjahdukselle.

Nurjahduslaskelmissa käytettävään jäykisteen teholliseen pinta-alaan lasketaan mukaan osa uumaa kuvan 6.6 mukaan. Sauvan päissä poikkileikkaukseen mukaan laskettava uuman osa saa olla enintään käytettävissä olevan todellisen mitan suuruinen.



Kuva 6.6 *Nurjahduslaskelmissa käytettävä jäykisteen poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala*

Tasosta pois tapahtuvan jäykisteen nurjahduksen kestävyys $N_{b,Rd}$ lasketaan luvun 6.3.3 mukaisesti käyttäen arvoja $\alpha = 0{,}49$ ja $\bar{\lambda}_0 = 0{,}2$. Jäykisteen nurjahduspituuden l määräytymisessä otetaan huomioon soveltuvat reunaehdot, mutta nurjahduspituus on kuitenkin pienempi kuin $0{,}75h_w$, kun jäykisteen molemmat päät ovat jäykästi tuetut poikittaissuuntaan. Suurempaa arvo kuin 0,75 h_w voidaan käyttää, jos reunaehdot sen sallivat. Vääntönurjahdus tarkistetaan X-poikkileikkaukselle.

Epäkeskisyys otetaan huomioon kohdan 6.5.2 mukaan yksipuolisia ja epäsymmetrisiä jäykisteitä mitoitettaessa.

Tukien ja sellaisten välijäykisteiden kohdilla, joihin vaikuttaa merkittävä ulkoinen voima, jäykisteen nurjahduskestävyyden tulee olla suurempi kuin tukireaktio tai em. vaikuttava voima. Muiden välijäykisteiden kohdalla jäykisteen puristusvoima N_{Ed} lasketaan kaavasta:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w{}^2} \frac{f_{yw}\, h_w\, t_w}{\sqrt{3}\, \gamma_{M1}} \tag{6.49}$$

missä:

V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo.

Em. kaavaa käytettäessä oletetaan, että tarkasteltava jäykiste poistetaan.

Välijäykisteen jäyhyysmomentin I_s tulee täyttää seuraavat ehdot:

$$\frac{a}{h_w} < \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq \frac{1{,}5\, h_w^3\, t^3}{a^2} \tag{6.50}$$

$$\frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq 0{,}75\, h_w\, t^3 \tag{6.51}$$

6.4.6 Taipumien laskeminen

Taipumat lasketaan käyttörajatilan kuormitusyhdistelmille.

Palkin taipuma (kun palkissa ei ole plastisia niveliä) lasketaan käyttäen tavanomaista taivutusteoriaa paitsi, että alkukimmokertoimen sijasta käytetään sekanttimodulia. Sekanttimodulin arvo riippuu palkin jännitystasosta, ja sekanttimodulin arvo voidaan laskea seuraavasti:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2} \tag{6.52}$$

missä:

E_{S1} on vedetyn laipan jännitystä vastaava sekanttimoduli

E_{S2} on puristetun laipan jännitystä σ_2 vastaava sekanttimoduli.

Sekanttimodulin arvot E_{S1} ja E_{S2} käyttörajatilan jännityksille arvioidaan seuraavasti:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0{,}002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y}\right)^n} \qquad \text{ja } i = 1{,}2 \tag{6.53}$$

missä:

$\sigma_{i,Ed,ser}$ on käyttörajatilan jännitys veto- tai puristusjännityksellä olevalle laipalle

E on kimmomoduli = 200×10^3 N/mm^2

n on Ramberg-Osgood mallin parametri

Parametri n määritetään suhteellisuusrajan perusteella ja se siten kuvaa jännitys-venymä-kuvaajan epälineaarisuutta; pienempi arvo tarkoittaa epälineaarisempaa kuvaajaa. Parametrin n arvoon vaikuttavat ruostumattoman teräksen tyyppi, valmistusprosessi, kylmämuokkausaste, ja kuormituksen suunta (veto tai puristus) ja mitatuissa arvoissa on suuri hajonta. Suositeltavat arvot esitetään taulukossa 6.4.

Taulukko 6.4 *Parametrin n arvot sekanttimodulin määrittämiseksi*

Terästyyppi	Parametri n
Ferriittinen	14
Austeniittinen	7
Duplex	8

Standardissa EN 1993-1-4 parametrin n arvot tällä hetkellä ovat riippuvaisia terästyypistä ja valssaussuunnasta (taulukko 6.5). On huomattava, että duplex ruostumattomille teräksille n-arvo perustuu hyvin pieneen määrään testituloksia ja sen otaksutaan olevan liian matala. On oletettavaa, että taulukon 6.5 esittämät n-parametrin arvot korvataan taulukon 6.4 mukaisiksi standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

Taulukko 6.5 *Parametrin n arvot sekanttimodulin määrittämiseksi*

Terästyyppi	Teräslaji	Parametri *n*	
		Pituussuuntainen	Poikittaissuuntainen
Ferriittinen	1.4003	7	11
	1.4016	6	14
	1.4512	9	16
Austeniittinen	1.4301, 1.4306, 1.4307, 1.4318, 1.4541	6	8
	1.4401, 1.4404, 1.4432, 1.4435, 1.4539, 1.4571,	7	9
Duplex	1.4462, 1.4362	5	5
Huom.: Mikäli rakenneosan suuntaa ei tiedetä tai sitä ei voida taata, niin varmalla puolella olevana voidaan käyttää pituussuuntaista arvoa.			

Ruostumattoman teräksen epälineaarinen jännitys-venymä-yhteys tarkoittaa, että kimmomodulin arvo vaihtelee poikkileikkauksessa sekä sauvan pituussuunnassa. Siksi ruostumattomasta teräksestä valmistettujen palkkien taipuman määrittämiseksi tarkasti tarvitaan vaativia epälineaarisia laskentamenettelyjä. Yksinkertaistuksena sekanttimodulin E_S vaihtelu sauvan pituudella voidaan jättää huomioon ottamatta käyttämällä sekanttimodulin E_S minimiarvoa (vastaten sauvassa vaikuttavia maksimijännityksiä σ_1 ja σ_2) koko sauvan pituudella. On huomattava, että tämä menettely on tarkka taipuman laskentaan siinä tapauksessa, kun sekanttimodulin arvo perustuu sauvan maksimijännitykseen, joka on pienempi kuin 65 % 0,2%-rajan arvosta. Suuremmilla jännitystasoilla menetelmä on hyvin konservatiivinen ja silloin tulee käyttää tarkempia menetelmiä.

Poikkileikkausluokan 4 ja/tai sauvoissa, joissa leikkausviive pitää ottaa huomioon, laskelmissa käytetään tehollista poikkileikkausta. Ensimmäisenä approksimaationa on tarkoituksenmukaista käyttää tehollista poikkileikkausta, joka perustuu kohdan 5.4.1 ja/tai kohdan 5.4.2 mukaan laskettuun teholliseen poikkileikkaukseen. Tarkemmin laskettaessa on mahdollista käyttää tehollista poikkileikkausta, joka perustuu todelliseen jännitykseen perustuviin tehollisiin leveyksiin. Jännitykset lasketaan tällöin kohdan 5.4.1 (ei kohdan 5.4.2) mukaan käyttäen arvoa:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{\sigma}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} \tag{6.54}$$

missä:

σ on tehollisen poikkileikkauksen mukaan laskettu jännitys tarkasteltavassa kohdassa.

6.5 Sauvat, joihin kohdistuu samanaikaisia aksiaalisia kuormia ja taivutusmomentteja

6.5.1 Aksiaalinen veto ja taivutus

Sauvat, joihin kohdistuu samanaikainen veto ja taivutus mitoitetaan kiepahdukselle kohdan 6.4.2 mukaan siten, että pelkästään taivutusmomentti vaikuttaa. Sauvat tarkistetaan myös aksiaalisen voiman ja taivutuksen yhteisvaikutukselle suurimman taivutusmomentin ja aksiaalisen voiman vaikutuskohdassa. Seuraavan ehdon tulee olla voimassa:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{y,Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{M_{\mathrm{z,Rd}}} \leq 1 \tag{6.55}$$

missä:

N_{Ed} on aksiaalisen vetovoiman mitoitusarvo kriittisessä kohdassa

N_{Rd} on sauvan vetokestävyys

$M_{\mathrm{y,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitusarvo vahvemman akselin suhteen kriittisessä kohdassa

$M_{\mathrm{z,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitusarvo heikomman akselin suhteen kriittisessä kohdassa

$M_{\mathrm{y,Rd}}$ on taivutusmomenttikestävyyden mitoitusarvo vahvemman akselin suhteen, kun aksiaalista kuormaa ei ole (ks. kohta 5.7.4)

$M_{\mathrm{z,Rd}}$ on taivutusmomenttikestävyyden mitoitusarvo heikomman akselin suhteen, kun aksiaalista kuormaa ei ole (ks. Kohta 5.7.4).

6.5.2 Aksiaalinen puristus ja taivutus

Poikkileikkauksen kestävyyden tarkistamisen (tarkistaminen tehdään sauvan pituusakselin kaikissa poikkileikkauksissa, ks. 5.7.6) ja kohdan 6.4 mukaisten yleisten vaatimusten lisäksi puristavan voiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus tulee tarkistaa

Aksiaalinen puristus ja vahvemman akselin suhteen tapahtuva taivutus:

Nurjahduksen välttämiseksi tarkistetaan seuraava ehto, kun taivutus vaikuttaa vahvemman akselin suhteen

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min}}} + k_{\mathrm{y}}\left(\frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{Ny}}}{\beta_{\mathrm{W,y}} W_{\mathrm{pl,y}} f_y / \gamma_{\mathrm{M1}}}\right) \leq 1 \tag{6.56}$$

Heikomman akselin suhtaan tapahtuvan nurjahduksen välttämiseksi tarkistetaan seuraava ehto sauvoille, jotka voivat kiepahtaa:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min1}}} + k_{\mathrm{LT}}\left(\frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}\, e_{\mathrm{Ny}}}{M_{\mathrm{b,Rd}}}\right) \leq 1 \tag{6.57}$$

Aksiaalinen puristus ja heikomman akselin suhteen tapahtuva taivutus:

Nurjahduksen välttämiseksi heikomman akselin suhteen tarkistetaan ehto:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min}}} + k_z\left(\frac{M_{\mathrm{z,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}e_{\mathrm{Nz}}}{\beta_{\mathrm{W,z}}W_{\mathrm{pl,z}}f_y/\gamma_{\mathrm{M1}}}\right) \leq 1 \tag{6.58}$$

Aksiaalinen puristus ja kahden akselin suhteen tapahtuva taivutus:

Kaikkien sauvojen tulee täyttää ehto:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min}}} + k_{\mathrm{y}}\left(\frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}e_{\mathrm{Ny}}}{\beta_{\mathrm{W,y}}W_{\mathrm{pl,y}}f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M1}}}\right) + k_z\left(\frac{M_{\mathrm{z,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}e_{\mathrm{Nz}}}{\beta_{\mathrm{W,z}}W_{\mathrm{pl,z}}f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M1}}}\right) \leq 1 \tag{6.59}$$

Sauvojen, jotka voivat kiepahtaa, tulee täyttää myös ehto:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min1}}} + k_{\mathrm{LT}}\left(\frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}e_{\mathrm{Ny}}}{M_{\mathrm{b,Rd}}}\right) + k_z\left(\frac{M_{\mathrm{z,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}}e_{\mathrm{Nz}}}{\beta_{\mathrm{W,z}}W_{\mathrm{pl,z}}f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M1}}}\right) \leq 1 \tag{6.60}$$

Edellä olevissa kaavoissa:

e_{Ny} and e_{Nz} ovat poikkileikkauksen neutraaliakselien siirtymiä, jotka aiheutuvat tasan jakaantuneesta puristuksesta

N_{Ed}, $M_{\mathrm{y,Ed}}$ and $M_{\mathrm{z,Ed}}$ ovat poikkileikkauksessa vaikuttavat rasitusten mitoitusarvot

$(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min}}$ on $N_{\mathrm{b,Rd}}$:n pienin arvo seuraavissa neljässä nurjahdustapauksessa: taivutusnurjahdus y-akselin suhteen, taivutusnurjahdus z-akselin suhteen, vääntönurjahdus ja taivutusvääntönurjahdus (ks. kohdat 6.3.3 ja 6.3.4))

$(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min1}}$ on $N_{\mathrm{b,Rd}}$:n pienin arvo seuraavissa kolmessa nurjahdustapauksessa: taivutusnurjahdus z-akselin suhteen, vääntönurjahdus ja taivutusvääntönurjahdus (ks. kohdat 6.3.3 ja 6.3.4)

$\beta_{\mathrm{W,y}}$ and $\beta_{\mathrm{W,z}}$ $\beta_{\mathrm{W,z}}$ ovat β_{W}:n arvot y ja z akselien suhteen, missä

β_{W} = 1 poikkileikkausluokissa 1 ja 2

= $W_{\mathrm{el}}/W_{\mathrm{pl}}$ poikkileikkausluokassa 3

= $W_{\mathrm{eff}}/W_{\mathrm{pl}}$ poikkileikkausluokassa 4

$W_{\mathrm{pl,y}}$ ja $W_{\mathrm{pl,z}}$ ovat plastisuusteorian mukaiset taivutusvastukset y- ja z-akselien suhteen

$M_{\mathrm{b,Rd}}$ on kiepahduskestävyys (ks. kohta 6.4.2).

Yhteisvaikutustekijän k_{y}, k_{z} ja k_{LT} arvo avoimille poikkileikkauksille lasketaan seuraavasti:

$$k_{\mathrm{y}} = 1{,}0 + 2(\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} - 0{,}5)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} \qquad 1{,}2 \leq k_{\mathrm{y}} \leq 1{,}2 + 2\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} \tag{6.61}$$

$$k_z = 1{,}0 + 2(\bar{\lambda}_{\mathrm{z}} - 0{,}5)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min1}}} \qquad 1{,}2 \leq k_{\mathrm{z}} \leq 1{,}2 + 2\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{(N_{\mathrm{b,Rd}})_{\mathrm{min1}}} \tag{6.62}$$

$$k_{\mathrm{LT}} = 1{,}0$$

Yhteisvaikutustekijän k_{y} ja k_{z} arvo poikkileikkaukseltaan suorakaidemaisille ja pyöreille rakenneputkille lasketaan seuraavasti:

$$k_y = 1 + D_1\left(\bar{\lambda}_y - D_2\right)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} \leq 1 + D_1\left(D_3 - D_2\right)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} \tag{6.63}$$

$$k_z = 1 + D_1\left(\bar{\lambda}_z - D_2\right)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{\left(N_{\mathrm{b,Rd,y}}\right)_{\min 1}} \leq 1 + D_1\left(D_3 - D_2\right)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{\left(N_{\mathrm{b,Rd,y}}\right)_{\min 1}} \tag{6.64}$$

missä arvot D_1, D_2 ja D_3 annetaan taulukossa 6.6.

Taulukko 6.6 *Arvot suureille D_1, D_2 ja D_3*

Poikkileikkaus	Terästyyppi	D_1	D_2	D_3
RHS	Ferriittinen	1,3	0,45	1,6
	Austeniittinen	2,0	0,30	1,3
	Duplex	1,5	0,40	1,4
CHS	Ferriittinen	1,9	0,35	1,3
	Austeniittinen	2,5	0,30	1,3
	Duplex	2,0	0,38	1,3

Standardissa EN 1993-1-4:2015 tällä hetkellä esitetään kaavat (6.61) ja (6.62). Koska nämä ovat hyvin konservatiivisia rakenneputkille, on oletettavaa, että standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa esitetään myös kaavat (6.63) ja (6.64).

Huom.: Kansallinen liite voi esittää muitakin yhteisvaikutuskaavoja vaihtoehtoina yllä esitetyille.

Kulmateräksille edellisissä kaavoissa y- ja z- akselien sijasta käytetään akseleita u ja v.

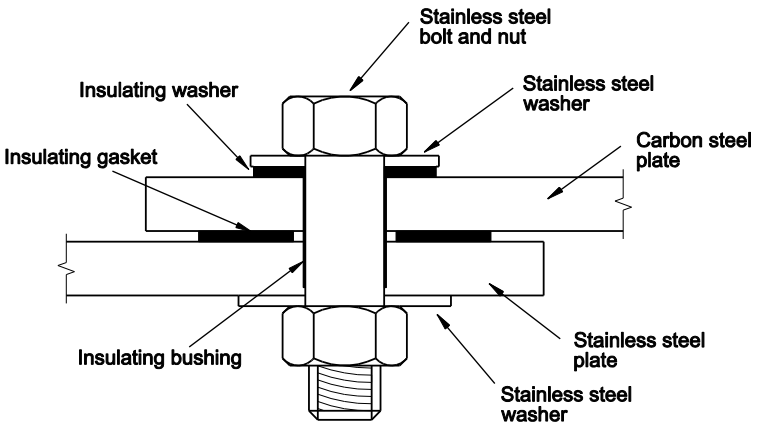
7 KIINNITYSTEN JA LIITOSTEN SUUNNITTELU

7.1 Yleiset ohjeet

7.1.1 Säilyvyys

Erityisesti kiinnitysten suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota ruostumattoman teräksen korroosiokestävyyden säilyttämiseksi. Tämä koskee erityisesti kiinnityksiä, jotka voivat kostua jostakin syystä, esim. sään, veden roiskumisen, veteen upottamisen, kondensaation yms. takia. Kiinnityksen siirtämistä kosteutta aiheuttavasta kohdasta muualle tulee harkita korroosion välttämiseksi. Vaihtoehtoisesti voi olla mahdollista eliminoida kosteuden lähde, esim. kondensoitumisriskin vähentäminen riittävällä ilmastoinnilla tai varmistamalla, että rakennetta ympäröivä lämpötila pysyy kastepisteen yläpuolella.

Jos hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen välisen kiinnityksen kostumista ei voida välttää, olisi harkittava metalliparikorroosion estämistä, ks. 3. Hiiliteräksestä tehdyn ruuvin ja ruostumattoman liitettävän osan liittämistä toisiinsa tulee aina välttää. Ruuviliitoksissa, jotka ovat alttiit korroosiolle, hiiliteräs ja ruostumaton teräs tulee eristää toisistaan sähköisen kosketuksen välttämiseksi. Tämä saadaan aikaan käyttämällä eristäviä aluslaattoja ja mahdollisesti holkkeja. Tyypillinen sopiva yksityiskohta esitetään kuvassa 7.1 tiukkaan (snug-tight) kireyteen asennetuille ruuvikokoonpanoille. Eristävien aluslaattojen ja holkkien materiaalina käytetään esimerkiksi neopreenia (synteettinen kumi), joka on riittävän joustavaa tiivistämään liitoksen siihen kohdistuvan painekuormituksen vaikuttaessa ja riittävän pitkäikäistä eristämään metallit pysyvästi toisistaan. Liitoksen tiivistäminen estää kosteuden imeytymisen, joka saattaisi aiheuttaa rakokorroosiota kiinnityksessä. On huomioitava, että eristävän aluslaatan reuna ei ulotu ruostumattoman aluslaatan ulkopuolelle, jolloin näiden väliin muodostuisi rako. Kloridia sisältävissä ilmastollisissa olosuhteissa täydentävä menettely kiinnityksen suojaamiseksi rakokorroosiolta on lisätä eristävä, joustava aluslaatta suoraan ruuvin kannan alle tai peittää alue silikonitiivisteellä.



Kuva 7.1 *Tyypillinen esimerkki erimateriaalien välisestä kiinnityksestä (vältetään eriparikorroosio)*

Hiiliterästen ja ruostumattomien terästen välisissä hitsausliitoksissa suositellaan yleensä, että hiiliteräkseen käytettävä maalausjärjestelmä ulotetaan hitsauksen yli ruostumattomaan teräkseen n. 75 mm: iä ulottuvalle alueelle.

Tulee olla huolellinen valittaessa materiaaleja annettuun ympäristöön ruuvikiinnitysten rakokorroosion välttämiseksi, ks. 3.2.2.

7.1.2 Suunnitteluoletukset

Liitokset voidaan mitoittaa jakamalla sisäiset voimat ja momentit kiinnityksessä realistisella tavalla ottaen huomioon liitettävien osien suhteellinen jäykkyys. Sisäisten voimien ja momenttien tulee olla tasapainossa vaikuttavien voimien ja momenttien kanssa. Jokainen kiinnityksen osa, jonka oletetaan siirtävän voimia, mitoitetaan analyysin mukaisille voimille ja momenteille ja liitettävillä osilla tulee olla riittävä muodonmuutoskyky.

7.1.3 Leikkauspisteet ja jatkokset

Liitoksessa kohtaavat sauvat suunnitellaan yleensä niin, että niiden painopisteakselit leikkaavat yhdessä pisteessä. Jos leikkauspisteessä on epäkeskeisyyttä, sauvat ja liitokset suunnitellaan syntyville momenteille. Kulmaterästen ja T-terästen ruuvikiinnityksissä, joissa käytetään vähintään kahta ruuvia, kulmateräksessä ja T-teräksessä olevien ruuvien asentamislinjoja voidaan pitää painopisteakseleina.

Palkkien jatkokset sijoitetaan mahdollisimman lähelle momentin nollakohtia. Pilarien jatkoksissa otetaan huomioon toisen kertaluvun vaikutukset (P-δ-vaikutus).

7.1.4 Muuta yleistä huomioonotettavaa

Jos kiinnitykseen kohdistuu isku, värähtely tai toistuva merkittävä jännitysvaihtelu, suositellaan hitsausliitoksia. Nämä kiinnitykset suunnitellaan myös väsymiselle (ks. kohta 8).

Kaikkien liitosten ja jatkosten suunnittelussa otetaan huomioon valmistus- ja asennusmahdollisuudet. Seuraaviin asioihin tulee kiinnittää huomiota:

- standardisoitujen yksityiskohtien käyttö;
- turvallisen asennuksen vaatima tila;
- kiinnittimien kiristämisen vaatima tila;
- luoksepäästävyys hitsattaessa;
- hitsausmenetelmien asettamat vaatimukset;
- kulma- ja pituustoleranssien vaikutukset osien yhteensovitukseen.

Austeniittisten ruostumattomien terästen hitsaus aiheuttaa suurempia hitsausmuodonmuutoksia hiiliteräkseen verrattuna (ks. 11.6.4). Tulee myös kiinnittää huomiota valmistuksen jälkeisiin rakenteiden tarkastus- ja huoltovaatimuksiin.

7.2 Ruuvikiinnitykset

7.2.1 Yleistä

Tämän ohjeita sovelletaan välyksellisiin ruuvikiinnityksiin, kun ruuviin kohdistuu leikkaus- tai vetorasitus tai niiden yhteisvaikutus. Esitetyt säännöt soveltuvat kiinnityksille, joissa käytetään ominaisuusluokkien 50, 70 ja 80 ruuvikokoonpanoja. Ominaisuusluokan 100 ruuvikokoonpanoja käytettäessä kiinnityksen kestävyys varmennetaan testauksella. Yleensä sekä ruuvin kannan, että mutterin alla käytetään aluslaattaa. Ohjeita ruuvien ja mutterien materiaalivalinnalle esitetään kohdissa 2.3 ja 11.7.

Kiinnitykseen kohdistuva leikkausrasitus siirtyy ruuvien ja liitettävien osien välisen reunapuristuksen välityksellä. Tässä käsikirjassa ei esitetä ohjeita kitkaliitoksille, ks. kuitenkin kohta 7.2.2.

Kiinnityksen kestävyys on pienempi seuraavista arvoista: liitettävien osien perusteella laskettu kestävyys (ks. 7.2.3) ja kiinnittimien perusteella laskettu kestävyys (7.2.4).

Ruuviliitosten palautumattomien muodonmuutosten välttämiseksi ruuvien ja nettopoikkileikkauksen jännitykset käyttörajatilan kuormilla rajoitetaan myötörajaan.

7.2.2 Esijännitetyt ruuvit

Käyttökokemusten puuttuessa ruostumattomista teräksistä valmistettujen ruuvikokoonpanojen käyttö esijännitettävissä liitoksissa on aiheuttanut seuraavanlaisen tiedon tarvetta:

- soveltuva kiristysmenetelmä, erityisesti jotta vältetään kitkasyöpyminen,
- ruostumattomassa teräksessä tapahtuvan jännitysrelaksaation vaikutus esijännitetyn kiinnityksen ominaisuuksiin,
- kitkakerroin ruostumattoman teräksen kitkapinnoille.

Tällä hetkellä käynnissä olevassa EU RFCS projektissa SIROCO tutkitaan ruostumattomista teräksistä valmistettujen esijännitettävien ruuvikokoonpanojen kiinnityksiä ja projektissa tuotetaan testaustuloksia edellä esitettyihin puutteisiin. Laaja testausohjelma ruostumattomilla ruuvikokoonpanoilla osoittaa:

- Austeniittiset ja duplex ruostumattomat teräkset voidaan hyväksyttävästi esijännittää edellyttäen, että käytetään soveltuvaa ruuvin teräslajia, kiristysmenetelmää ja voiteluainetta,
- Esijännityksen heikkeneminen ruostumattomilla ruuvikokoonpanoilla on verrattavissa esijännityksen heikkenemiseen hiiliteräksestä valmistetuilla ruuvikokoonpanoilla,
- Kitkakerroin raepuhalletuilla ruostumattomille teräspinnoille on vähintään sama kuin luokan B arvo 0,4 (EN 1090-2, EN 1993-1-8).

SIROCO projektin lopulliset suositukset ovat saatavilla projektin loppuraportissa, joka julkaistaan EU:n kirjakaupassa https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications vuoden 2018 lopulla ja suositukset oletetaan esitettävän standardin EN 1993-1-4 ja EN 1090-2 seuraavassa revisiossa. Siihen asti ruostumattomien esijännitettyjen liitosten hyväksyttävyys osoitetaan kitkaliitostestauksella.

7.2.3 Liitettävät osat

Reiät

Reiät voidaan tehdä joko poraamalla tai lävistämällä. Lävistämiseen liittyvä kylmämuokkaus voi kasvattaa korroosion mahdollisuutta ja sen takia lävistämällä tehtyjä reikiä ei tule käyttää, kun rakenne on aggressiivisessa ympäristössä (esim. syövyttävä teollisuus- tai meri-ilmasto).

Standardin mukaisten reikien suurimmat välykset ovat:

1 mm M12 ja M14 ruuveille (M14 ei ole standardin mukainen koko);

2 mm M16 - M24 ruuveille;

3 mm M27 ja sitä suuremmille ruuveille.

Reikien sijainti

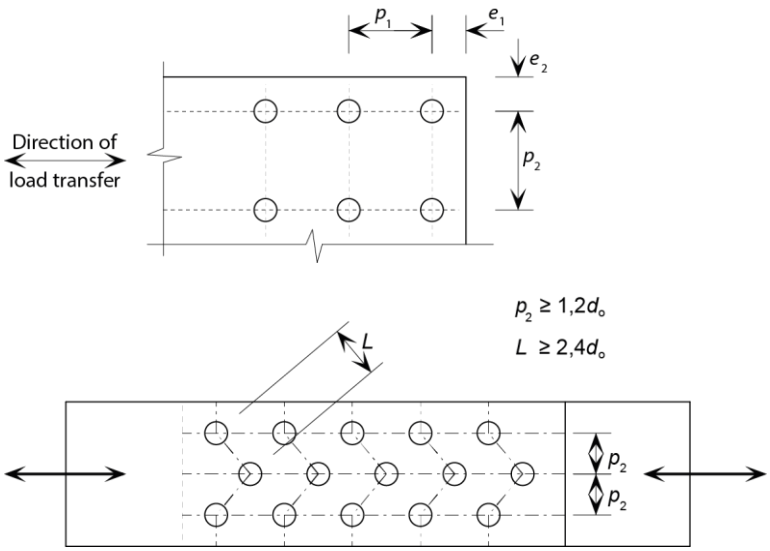
Reunaetäisyys on reiän keskipisteen ja vaikuttavan voiman suuntaisen levyn reunan välinen kohtisuora etäisyys. Päätyetäisyys on reiän keskipisteen ja vaikuttavaa voimaa vastaan kohtisuorassa olevan levyn reunan välinen etäisyys.

Päätyetäisyyden e_1 ja reunaetäisyyden e_2 (ks. kuva 7.2) minimiarvo on $1{,}4d_0$, missä d_0 on ruuvin reiän halkaisija. Riittävän reunapuristuskestävyyden saavuttamiseksi päätyetäisyyden tulee yleensä olla minimiarvoa suurempi, ks. jäljempänä.

Pääty- ja reunaetäisyyden suurin arvo on suurempi arvoista $12t$ ja 150 mm, missä t on ohuimman liitettävän uloimman osan paksuus.

Ruuvien keskeltä keskelle välin p_1 (ks. kuva 7.2) minimiarvo on $2{,}3d_0$ voiman suunnassa. Vastaava minimiarvo voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa p_2 on $2{,}7d_0$.

Liitettävien puristettujen levyjen lommahdus kaikissa suunnissa ruuvien välillä otetaan huomioon, ks. EN 1993-1-8.



Kuva 7.2 *Reikien sijainnin merkinnät*

Limitettyjen ruuvirivien tapauksessa, yhdensuuntaisten ruuvirivien välisen etäisyyden minimiarvona voidaan käyttää arvoa $p_2 = 1{,}2d_0$ jos limitetyssä linjassa olevan minkä tahansa kahden ruuvin välinen minimietäisyys on $2{,}4d_0$, ks. kuva 7.2.

Reunapuristuskestävyys

Ruostumattomissa teräksissä kiinnitysten reunapuristuskestävyys määritetään joko perustuen lujuus- tai muodonmuutoskriteeriin. Ruuvikiinnityksen kestävyys reunapuristukselle $F_{\mathrm{b,Rd}}$ esitetään:

$$F_{\mathrm{b,Rd}} = \frac{2{,}5\ \alpha_{\mathrm{b}}\ k_{\mathrm{t}}\ t\ d\ f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.1}$$

missä:

- α_{b} on kerroin reunapuristukselle kuormituksen suunnassa
- k_{t} on kerroin reunapuristukselle poikittaissuunnassa kuormitukseen nähden
- d on ruuvin halkaisija
- t on liitettävän levyn paksuus
- f_{u} on liitettävien levyjen karakteristinen vetomurtolujuus (taulukko 2.2).

Ruuvikiinnitykset luokitellaan kiinnitettävien levyjen paksuuden perusteella kahteen ryhmään. Kiinnitykset suurilla levynpaksuuksilla tarkoittavat levynpaksuuksia yli 4 mm ja liitokset ohuilla levyillä, kun liitettävien levyjen paksuudet ovat 4 mm tai ohuempia.

Kertoimet reunapuristukselle, kun kiinnitys suurille levynpaksuuksille

Suurilla levynpaksuuksilla, kun muodonmuutos ei ole suunnittelua rajoittava, kiinnityksen reunapuristuksen kerroin α_{b} kuormituksen suunnassa määritetään kaavalla (7.2), ja reunapuristuksen kerroin k_{t} kuormitukseen nähden poikittaissuunnassa määritetään kaavasta (7.3).

$$\alpha_{\mathrm{b}} = \min\left\{1{,}0,\quad \frac{e_1}{3d_0}\right\} \tag{7.2}$$

$$k_{\mathrm{t}} = \begin{cases} 1{,}0 & \text{kun } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) > 1{,}5 \\ 0{,}8 & \text{kun } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) \leq 1{,}5 \end{cases} \tag{7.3}$$

Suurilla levynpaksuuksilla, kun muodonkuutos on suunnittelua rajoittava, kiinnityksen reunapuristuksen kerroin α_{b} määritetään kaavasta (7.4) ja $k_{\mathrm{t}} = 0{,}5$.

$$\alpha_{\mathrm{b}} = \min\left\{1{,}0,\quad \frac{e_1}{2d_0}\right\} \tag{7.4}$$

Kertoimet reunapuristukselle, kun kiinnitys ohuille levynpaksuuksille

Ohuille levynpaksuuksille, kun muodonmuutos ei ole suunnittelua rajoittava, kiinnityksen reunapuristuksen kertoimet α_{b} ja k_{t} sisemmälle levylle kaksi leikkeisessä kiinnityksessä ovat samat kaavat (7.2) ja (7.3) kuin kiinnityksille paksummissa levyissä.

Kiinnitys ohuille levynpaksuuksille, kun muodonmuutos ei ole suunnittelua rajoittava, yksileikkeisessä kiinnityksessä ja ulommille levyille kaksileikkeisessä reunapuristuksen kerroin α_{b} määritetään kaavalla (7.4) ja k_{t} = 0,64.

Ohuilla levynpaksuuksilla, kun muodonmuutos on suunnittelua rajoittava, kiinnityksen reunapuristuksen kerroin α_{b} määritetään kaavalla (7.4) ja k_{t} = 0,5.

On oletettavaa, että standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa nämä kaavat korvaavat hyvin konservatiiviset standardin EN 1993-1-4 esittämät kaavat, jotka ovat standardin EN 1993-1-8 mukaisia, kuitenkin käyttäen pienennettyä murtolujuuden $f_{\mathrm{u,red}}$ arvoa murtolujuuden f_{u} sijasta, missä

$$f_{\mathrm{u,red}} = 0{,}5 f_y + 0{,}6 f_u \tag{7.5}$$

Kiinnitinryhmän kestävyys voidaan määrittää yksittäisten kiinnittimien reunapuristusten $F_{\mathrm{b,Rd}}$ summana edellyttäen, että yksittäisen kiinnittimen leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{\mathrm{v,Rd}}$ on vähintään yhtäsuuri kuin vastaava reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo $F_{\mathrm{b,Rd}}$. Muussa tapauksessa kiinnitinryhmän kestävyys lasketaan pienimmän yksittäisen kiinnittimen kestävyyden perusteella kertomalla ko. arvo kiinnittimien lukumäärällä.

Vetokestävyys

Liitettävän osan vetokestävyys on pienempi arvoista:

a) Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyys:

$$N_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{A f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} \tag{7.6}$$

b) nettopoikkileikkauksen kestävyys kiinnittimien reikien kohdalla:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{k\, A_{\mathrm{net}}\, f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.7}$$

missä eri termit ovat kohdan 5.7.2 mukaisia

Vaadittaessa sitkeää käyttäytymistä bruttopoikkileikkauksen myötäämisen perusteella lasketun kestävyyden tulee olla pienempi kuin nettopinta-alan perusteella lasketun kestävyyden. Sitkeysvaatimukset ja vaatimus kiertymiskyvylle esitetään EN 1993-1-8. Maanjäristysmitoitusta koskevat vaatimukset esitetään EN 1998.

Palamurtuminen

Voidaan käyttää EN 1993-1-8:n ohjeita.

Yhdestä kyljestä kiinnitetyt kulmateräkset tai muut epäsymmetrisesti kiinnitetyt vedetyt sauvat

Kiinnitysten epäkeskeisyys ja ruuvien päätyetäisyyksien ja keskiöetäisyyksien vaikutukset otetaan huomioon määritettäessä epäsymmetristen profiilien kestävyyttä sekä epäsymmetrisesti kiinnitettyjen symmetristen profiilien kestävyyttä, kuten esim. kiinnitettäessä kulmateräksiä yhdestä kyljestä.

Yhdestä kyljestä yhdellä ruuvirivillä kiinnitetyt kulmateräkset voidaan käsitellä keskeisesti kuormitettuina ja nettopoikkileikkauksen mitoituskestävyys lasketaan seuraavasti:

Yksi ruuvi:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{2{,}0\,(e_2 - 0{,}5 d_0)\, t\, f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.8}$$

Kaksi ruuvia:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{\beta_2\, A_{\mathrm{net}}\, f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.9}$$

Kolme tai useampia ruuveja:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{\beta_3 \, A_{\mathrm{net}} \, f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.10}$$

missä:

β_2 ja β_3 ovat etäisyydestä p_1 taulukon 7.1 mukaan riippuvia pienennystekijöitä. β:n arvot p_1:n väliarvoille voidaan interpoloida lineaarisesti.

A_{net} on kulmateräksen nettopinta-ala. Pienemästä kyljestä kiinnitetylle erikylkiselle kulmateräkselle pinta-alaksi A_{net} valitaan ekvivalentin tasa-kylkisen kulmateräksen nettopinta-ala, jolloin ekvivalentti kulmateräs tarkoittaa erikylkisen kulmateräksen pienemmän kyljen perusteella määritettyä tapausta.

Taulukko 7.1 *Pienennystekijät β_2 ja β_3*

Kiinnitys	Tekijä	Keskiöetäisyys p_1	
		$\leq 2{,}5d_0$	$\geq 5{,}0d_0$
2 ruuvia	β_2	0,4	0,7
3 ruuvia tai enemmän	β_3	0,5	0,7

7.2.4 Kiinnittimet

Nettopinta-alat

Laskettaessa ruuvin vetokestävyyttä käytetään ruuvin pinta-alana tuotestandardin mukaista jännityspoikkipinta-alaa.

Ruuvien leikkauskestävyyttä laskettaessa voidaan käyttää kierteettömän varren pinta-alaa, jos kierteellinen osa ei ole leikkaustasossa. Tällöin tulee ottaa huomioon se mahdollisuus, että ruuvit voidaan asentaa paikoilleen molemmilta puolin. Muissa tapauksissa käytetään ruuvin jännityspoikkipinta-alaa.

Leikkauskestävyys

Ruuvin leikkauskestävyys riippuu leikkaustasojen lukumäärästä ja niiden sijainnista ruuvin varren suhteen. Kun vetoa ei ole, ruuvin leikkauskestävyys leikkaustasoa kohti voidaan laskea seuraavasti:

$$F_{\mathrm{v,Rd}} = \frac{\alpha \, f_{\mathrm{ub}} \, A}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.11}$$

missä:

A on ruuvin poikkileikkausala (jos ruuvin kierteetön osa on leikkaustasossa); tai ruuvin jännityspinta-ala (jos ruuvin kierteet ovat leikkaustasossa)

f_{ub} on ruuvin vetomurtolujuus (Taulukko 2.6).

Tekijän α arvo voidaan määritellä kansallisessa liitteessä. Suositusarvo on 0,6, joka soveltuu, kun kierteet ovat leikkaustasossa tai leikkaustaso on ruuvin kierteettömällä alueella.

Standardissa EN 1993-1-4 on virhe tekijän α suositusarvolle kun kierteet sijaitsevat leikkaustasossa. Tekijälle on annettu arvo $\alpha = 0{,}5$ mutta tämän oletetaan kasvavan standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa arvoon $\alpha = 0{,}6$.

Vetokestävyys

Ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvo $F_{\mathrm{t,Rd}}$ lasketaan kaavasta:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{\mathrm{ub}} A_{\mathrm{s}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.12}$$

missä:

k_2 = 0,63 uppokantaisille ruuveille, muuten k_2 = 0,9.

Liitoksissa, joihin kohdistuu ulkoinen vetovoima, voi syntyä vipuvoimia, jotka tulee ottaa huomioon. Ohjeita vipuvoimien laskemiseksi esitetään standardissa EN 1993-1-8.

Yhdistetty leikkaus ja veto

Kun ruuviin kohdistuu samanaikainen leikkausvoiman, $F_{\mathrm{v,Ed}}$, ja vetovoima (vipuvoima mukaanlukien), $F_{\mathrm{t,Ed}}$, näiden yhteisvaikutus otetaan huomioon. Yhteisvaikutus tarkistetaan seuraavasti:

$$\frac{F_{\mathrm{v,Ed}}}{F_{\mathrm{v,Rd}}} + \frac{F_{\mathrm{t,Ed}}}{1{,}4\, F_{\mathrm{t,Rd}}} \leq 1{,}0 \tag{7.13}$$

missä $F_{\mathrm{v,Rd}}$ ja $F_{\mathrm{t,Rd}}$ on esitetty edellä. Lisäksi tarkistetaan, että vaikuttava vetovoima (vipuvoima mukaanlukien) on pienempi kuin vetovoimakestävyys.

Pitkät liitokset ja paksut liitokset

Epätavallisten pitkien kiinnitysten (500 mm tai vähintään 15 kertaa ruuvin halkaisija) tapauksessa sekä jos kiinnityspaksuus (liitettävien osien kokonais-paksuus) ylittää arvon 5 kertaa ruuvin halkaisija, kiinnityksen leikkauskestävyyttä pienennetään. Ruostumattomia teräksiä koskevien tarkempien ohjeiden puuttuessa suositellaan käytettäväksi hiiliteräkselle laadittuja EN 1993-1-8:n mukaisia ohjeita.

7.3 Mekaaniset kiinnittimet ohuille materiaaleille

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen ohutlevyjen kiinnitykset itse-kierteittävillä ohutlevyruuveilla voidaan mitoittaa standardin EN 1993-1-3 mukaisesti, lukuun ottamatta läpivetolujuutta, joka määritetään testaamalla. Ruuvin kiinnileikkautumisen tai kierteiden irtoamisen välttämiseksi, ruuvin porautuminen ja kierteiden muodostaminen voidaan osoittaa testaamalla, ellei työstä ole aikaisempaa kokemusta.

7.4 Hitsauskiinnitykset

7.4.1 Yleistä

Hitsauksen aikaiset materiaalin kuumenemis- ja jäähtymissyklit vaikuttavat kaikilla ruostumattomilla teräksille materiaalin mikrorakenteeseen, ja tämä on erityisen tärkeää huomioida duplex ruostumattomille teräksille. Oleellista on, että käytetään oikeita hitsausprosesseja ja että käytetään perusaineen kanssa yhteensopivia lisäaineita ja että pätevöityneet hitsaajat tekevät työn, ks. kohta 11.6. Tämä on tärkeä hitsin riittävän lujuuden ja oikean muodon saavuttamiseksi sekä hitsin ja ympäröivän perusaineen korroosiokestävyyden säilymiseksi.

Seuraavia ohjeita sovelletaan täysin ja osittain läpihitsattuihin päittäishitseihin sekä pienahitseihin, jotka hitsataan kaarihitsausmenetelmillä, kuten:

Menetelmän numero	Menetelmän nimi
111	Puikkohitsaus
121	Jauhekaarihitsaus
122	Jauhekaarinauhahitsaus
131	MIG-hitsaus
135	MAG-hitsaus
137	MIG-täytelankahitsaus
141	TIG-hitsaus
15	Plasmahitsaus

(Menetelmien numerot ovat EN ISO 4063 mukaisia.)

Yhteensopivat hitsausaineet valitaan siten, että niiden myötöraja, murtolujuus, murtovenymä ja Charpy-V iskukokeen energia arvo ovat vähintään yhtä suuret tai ylittävät perusaineen vastaavat arvot. Kuitenkin, austeniittisille teräksille kylmämuokatussa tilassa, lisäaineen nimellinen lujuus voi olla alhaisempi kuin perusaineen, (ks. kohta 7.4.4). Taulukossa 7.2 esitetään eri teräslajeille soveltuvia hitsauslisäaineita.

Hitsattaessa ruostumattomia teräksiä hiiliteräksiin, hitsauksen lisäaineeksi valitaan yliseostettu lisäaine, jotta liitoksen mekaaniset ominaisuudet ja korroosionkestävyys voidaan säilyttää. Yliseostuksella vältetään ruostumattoman teräksen seosainepitoisuuden laimeneminen liitoksen sula-alueella. Kun ruostumattomia teräksiä hitsataan sinkittyihin teräksiin, poistetaan sinkkikerros liitosalueelta ennen hitsaamista. Sinkkisulkeumat voivat aiheuttaa materiaalin haurastumista tai heikentää hitsin korroosionkestävyyttä ja hitsattaessa sinkkikerroksen läpi syntyy hitsaushuuruja, jotka ovat merkittävä terveysriski. Kun sinkitys on poistettu, hitsaukselle asetetut vaatimukset ovat samat kuin hitsattaessa ruostumatonta terästä tavalliseen hiiliteräkseen.

Taulukko 7.2 *Esimerkkejä soveltuvista teräslajeista ja hitsauslisäaineista*

Perusmateriaali		Hitsauslisäaine	
Tyyppi	Teräslaji	EN ISO 3581:2012 Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of stainless and heat-resisting steels. Classification	EN ISO 14343:2009 Welding consumables. Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heat resisting steels. Classification
Austeniittinen	1.4301, 1.4307, 1.4318	19 9 L	
	1.4541	19 9 L tai 19 9 Nb	
	1.4401, 1.4404	19 12 3 L	
	1.4571	19 12 3 L tai 19 12 3 Nb	
Duplex	1.4482, 1.4162, 1.4362, 1.4062	23 7 N L tai 22 9 3 N L	
	1.4062 (2202)	23 7 N L tai 22 9 3 N L	
	1.4662, 1.4462	22 9 3 N L	
Ferriittinen	1.4003	13 tai 19 9 L	
	1.4016	19 9 L tai 23 12 L	
	1.4509	19 9 Nb tai 18 8 Mn	
	1.4521	19 12 3 L tai 23 12 2L	
Austeniittisilla hitsauslisäaineilla 0,2%-rajan minimiarvo n. 320-350 N/mm^2 ja vetomurtolujuus 510-550 N/mm^2. Duplex hitsauslisäaineilla 0,2%-rajan minimiarvo on n. 450 N/mm^2 ja vetomurtolujuus 550 N/mm^2.			

Ruostumattoman teräksen ja hitsauslisäaineiden valmistajat neuvovat tarkoituksenmukaisen hitsauslisäaineen valinnassa. Hitsausmetallin tulee olla vähintään yhtä jaloa kuin perusaine.

Katkopienahitsejä ja ei-jatkuvia osittain läpihitsattuja päittäishitsejä tulee välttää korroosiomahdollisuuden pienentämiseksi lukuun ottamatta lieviä ympäristöolosuhteita. Katkonaisia päittäishitsejä tulee käyttää varoen meri-ilmastossa tai erittäin saastuneissa ympäristöissä erityisesti tilanteissa, joissa voi esiintyä kapillaarisuutta.

7.4.2 Pienahitsit

Soveltamisalue

Pienahitsejä voidaan käyttää osien liittämiseen, jos liitospintojen muodostama kulma on 60° - 120°. Jos em. kulma on pienempi kuin 60°, pienahitsejä voidaan käyttää, mutta ne mitoitetaan silloin osittain läpihitsattuina päittäishitseinä. Kulman ollessa yli 120° ei saa luottaa siihen, että hitsit siirtävät voimia.

Pienahitsiä ei saa käyttää tapauksissa, joissa siihen kohdistuu taivutusmomentti hitsin pituussuuntaisen akselin suhteen siten, että se aiheuttaa vetoa hitsin juureen.

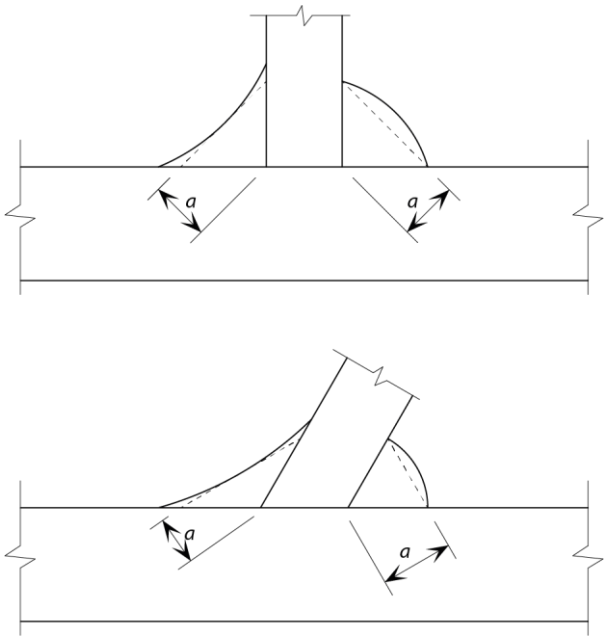
Tehollinen pituus ja a-mitta

Pienahitsin tehollisekseksi pituudeksi valitaan täysikokoisen hitsin kokonaispituus. Hitsejä, joiden tehollinen pituus on lyhyempi kuin 30 mm tai kuusi kertaa hitsin a-mitta, ei käsitellä voimia siirtävinä hitseinä.

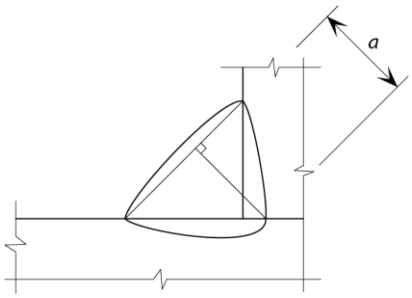
Pienahitsin a-mitaksi valitaan suurimman kolmion korkeus (yleensä tasakylkinen kolmio), joka voidaan piirtää railon kylkien ja hitsin pinnan sisään mitattuna

kohtisuorassa suunnassa tämän kolmion uloimpaan pintaan, ks. kuva 7.3. Pienahitsin syvää tunkeumaa, ks. kuva 7.4 voidaan hyödyntää vain, jos menetelmäkokeet osoittavat, että vaadittu tunkeuma saavutetaan systemaattisesti.

.



Pienahitsin a-mitta



Kuva 7.4 *Pienahitsin a-mitta, kun tunkeumaa käytetään hyväksi*

Mitoittava jännitys ja leikkauskestävyyden mitoitusarvo

Mitoittava jännitys on kaikkien hitsin siirtämien voimien ja momenttien vektorisumma. Mitoittava jännitys lasketaan teholliselle pituudelle ja hitsin paksuudelle (kts. yllä).

Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo on riittävä, kun molemmat seuraavista ehdoista toteutuvat:

$$\left[\sigma_{\perp}^{2} + 3(\tau_{\perp}^{2} + \tau_{\parallel}^{2})\right]^{0,5} \leq \frac{f_{\mathrm{u}}}{\beta_{\mathrm{w}}\gamma_{\mathrm{M2}}} \tag{7.14}$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{M2}} \tag{7.15}$$

missä:

$\sigma_{\perp}$ on laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys

$\tau_{\perp}$ on hitsin akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)

$\tau_{\parallel}$ on hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa)

f_u on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo

β_w 1,0 kaikille lujuusluokille, ellei pienempää arvoa osoiteta kokeellisesti perustelluksi.

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää standardin EN 1993-1-8 yksinkertaistettua menetelmää pienahitsin kestävyyden määrittämiseksi.

7.4.3 Päittäishitsit

Täysin läpihitsatut päittäishitsit

Täysin läpihitsattujen päittäishitsien kestävyyden mitoitusarvoksi valitaan heikomman liitettävän osan kestävyyden mitoitusarvo edellyttäen, että hitsi suunnitellaan kohdan 7.4.1 mukaan.

Osittain läpihitsatut päittäishitsit

Osittain läpihitsattuja päittäishitsejä voidaan käyttää leikkausvoimien siirtämiseksi. Niitä ei suositella rakenteisiin, joissa hitseihin kohdistuu vetoa.

Osittain läpihitsattujen päittäishitsien kestävyys lasketaan kuten sellaisten pienahitsien kestävyys, joissa hyödynnetään tunkeumaa. Osittain läpihitsatun päittäishitsin a-mitaksi valitaan systemaattisesti saavutettavan tunkeuman syvyys, joka määritetään menetelmäkokein. Mikäli menetelmäkokeita ei ole suoritettu, hitsin paksuuden voidaan olettaa olevan railon syvyys vähennettynä 3 mm.

7.4.4 Kylmämuokatussa tilassa olevan ruostumattoman teräksen hitsaaminen

Yleisesti, hitsattaessa kylmämuokatussa tilassa olevia ruostumattomia teräksiä noudatetaan samoja periaatteita kuin hitsattaessa hehkutetun tilan ruostumattomia teräksiä. Kuitenkin päittäishitsin hitsauksen lämpövaikutukselle altistuneella alueella (HAZ), perusaineen kestävyyden määrittämiseksi käytetään hehkutetun tilan materiaalin murtolujuutta.

Hitsauslisäaineen nimellinen lujuus voi olla matalampi kuin perusaineen, jolloin pienahitsin ja päittäishitsin kestävyys määritetään perustuen hitsauslisäaineen nimelliseen murtolujuuteen. Korrelaatiokertoimen β_w arvo on 1,0 (ks. taulukko 7.2).

Austeniittisia hitsauslisäaineita käytetään yleisesti hitsattaessa kylmämuokatussa tilassa olevia ruostumattomia teräksiä. Duplex hitsauslisäaineita voidaan myös käyttää edellyttäen, että hitsin mekaaniset ominaisuudet varmennetaan testaamalla.

Kylmämuokattujen materiaalien hitsatuissa liitoksissa lämpövaikutukselle altistuneilla alueilla (HAZ) hehkutus voi olla epätäydellinen ja siten todellinen liitoksen lujuus voi olla korkeampi kuin määritettynä täysin hehkutetun tilan lujuuden perusteella. Näissä tapauksissa on mahdollista taata korkeampi lujuus testaamalla.

8 PALOMITOITUS

8.1 Yleistä

Tässä luvussa käsitellään ruostumattomasta teräksestä tehtyjen kantavien rakenteiden suunnittelua, joille asetetaan rakenteellisia palonkestovaatimuksia. Tässä käsitellään vain passiivisia palosuojausmenetelmiä ja tässä esitetyt ohjeet koskevat teräslajeja ja rakenteita, jotka suunnitellaan tämän käsikirjan kohtien 4 – 7 mukaisesti.

Austeniittiset ruostumattomat teräkset säilyttävät yleensä suhteellisesti paremmin huoneenlämpötilan mukaisen lujuutensa kuin hiiliteräkset, kun lämpötila on suurempi kuin n. 550 °C. Kaikki ruostumattomat teräkset säilyttävät hiiliteräksiä paremmin jäykkyytensä kaikissa lämpötiloissa.

Standardissa EN 1991-1-2 esitetään tulipalolle altistettujen rakenteiden mekaaniset ja lämpövaikutukset. Eurocodeissa tulipaloa käsitellään poikkeuksellisena kuormitustilanteena. Standardissa EN 1993-1-1 esitetään kuormitusyhdistelmät poikkeuksellisessa kuormitustapauksessa ja suositellaan kuormien osavarmuusluvuille arvoa 1,0. Standardissa EN 1993-1-2 suositellaan materiaalin osavarmuusluvulle $\gamma_{M,fi}$ arvoa 1,0 tulipalotilanteessa.

Ruostumattomasta teräksestä tehdyille rakenteille asetettavat palotekniset toimivuusvaatimukset ovat samat kuin hiiliteräkselle asetetut vaatimukset, nimittäin:

- Kun rakenteelta vaaditaan mekaanista kestävyyttä palotilanteessa, rakenne suunnitellaan ja rakennetaan siten, että se säilyttää kuormankantokykynsä kyseeseen tulevan tulipalon ajan.
- Jos palosuojaus tai osastoivan rakenneosan suunnittelukriteeri edellyttää muodonmuutoskriteerin käyttöä kantavassa rakenteessa, sovelletaan kyseeseen tulevia muodonmuutoskriteerejä. Kuitenkaan, mikäli osastoivan rakenteen mitoitus perustuu standardipalokäyrään, kuormaa kantavan rakenteen muodonmuutoksia ei ole tarpeellista ottaa huomioon.

8.2 Mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa

Standardissa EN 1993-1-2:2005 esitetään kahdeksan sarjaa lujuuden pienennyskertoimia eri ruostumattomille teräslajeille, kun taas hiiliteräslajeille esitetään yksi sarja. Ruostumattomien terästen pienennyskertoimille sovelletaan useampaa sarjaa pienennyskertoimille, koska korkeissa lämpötiloissa eri ruostumattomien teräslajien ominaisuudet eroavat toisistaan merkittävästi erilaisen kemiallisen koostumuksen johdosta. Standardin EN 1993-1-2 seuraavassa revisiossa on odotettavissa, että ruostumattomat teräkset, joilla on samanlaiset korkean lämpötilan ominaisuudet, ryhmiteltäisiin sarjoihin ja pienennyskertoimet esitettäisiin näille ryhmille korvaten siten yksilöllisen teräslajikohtaisen pienennyskertoimen. Nämä geneeriset pienennyskertoimien arvot esitetään tässä kohdassa.

Taulukossa 8.1 esitetään lujuuden ja jäykkyyden pienennystekijät suhteessa 20 °C: een lämpötilaa vastaavaan arvoon seitsemän ruostumattoman teräslajiryhmän jännitys-venymäyhteyksien määrittämiseksi korkeissa lämpötiloissa. Tekijät on määritetty seuraavasti:

$k_{p0,2,\theta}$ 0,2-raja lämpötilassa θ suhteessa 20 °C:en lämpötilaa vastaavaan mitoituslujuuteen, ts.:

$$k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta}/f_y \tag{8.1}$$

$k_{2,\theta}$ 2% kokonaisvenymää vastaava jännitys lämpötilassa θ suhteessa 20 °C:en lämpötilaa vastaavaan mitoituslujuuteen, ts.:

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y \quad \text{mutta} \quad f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta} \tag{8.2}$$

$k_{u,\theta}$ Vetomurtolujuus lämpötilassa θ suhteessa 20 °C:n lämpötilaa vastaavaan arvoon, ts.:

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u \tag{8.3}$$

$k_{E,\theta}$ Lineaarinen alkukimmokerroin lämpötilassa θ suhteessa 20 °C:n lämpötilaa vastaavaan arvoon, ts.:

$$k_{E,\theta} = E_\theta/E \tag{8.4}$$

$k_{\varepsilon u,\theta}$ on murtovenymän murtolujuutta vastaavalla jännityksellä lämpötilassa θ suhde murtovenymään murtolujuutta vastaavalla jännityksellä lämpötilassa 20°C, ts.:

$$k_{\varepsilon u,\theta} = \varepsilon_{u,\theta}/\varepsilon_u \tag{8.5}$$

missä:

E on kimmokerroin lämpötilassa 20°C (=200×10^3 N/mm^2)

f_y on myötölujuuden ominaisarvo lämpötilassa 20°C, kohdan 2.3 mukaan

f_u on vetolujuuden ominaisarvo lämpötilassa 20°C, kohdan 2.3 mukaan.

Kylmämuokatussa tilassa olevalle materiaalille tai kylmämuovaamalla tapahtuneen valmistuksen seurauksena kohonneelle lujuudelle käytetään seuraavia lujuuden pienennyskertoimia:

$k_{p0,2,\theta,CF} = k_{p0,2,\theta}$	$200 \leq \theta \leq 700$ °C
$k_{p0,2,\theta,CF} = 0{,}8\ k_{p0,2,\theta}$	$\theta \geq 800$°C
$k_{2,\theta,CF} = k_{2,\theta}$	$200 \leq \theta \leq 700$ °C
$k_{2,\theta,CF} = 0{,}9\ k_{2,\theta}$	$\theta \geq 800$°C
$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta}$	kaikissa lämpötiloissa:

Kaavoissa alaindeksi CF viittaa materiaaliin kylmämuokatussa tilassa.

On huomioitava, että kohdassa 8.3 esitetyissä yksinkertaisissa palonkestävyyden laskentamenettelyissä käytetään materiaalin lujuuksia seuraavasti:

Pilarit	$f_{p0,2,\theta}$	(kaikki poikkileikkausluokat)
Tuetut palkit	$f_{2,\theta}$	(poikkileikkausluokat 1-3)
	$f_{p0,2,\theta}$	(poikkileikkausluokka 4)
Tukemattomat palkit	$f_{p0,2,\theta}$	(kaikki poikkileikkausluokat)
Vedetyt rakenteet	$f_{2,\theta}$	(kaikki poikkileikkausluokat)

Taulukko 8.1 *Lujuuden, jäykkyyden ja venymän pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa*

Lämpötila θ (°C)	Pienennystekijä $k_{p0,2,\theta}$	Pienennystekijä $k_{2,\theta}$	Pienennystekijä $k_{u,\theta}$	Pienennystekijä $k_{E,\theta}$	Pienennystekijä $k_{\varepsilon u,\theta}$
Austeniittinen I 1.4301, 1.4307, 1.4318					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,78	1,02	0,81	0,96	0,56
200	0,65	0,88	0,72	0,92	0,42
300	0,60	0,82	0,68	0,88	0,42
400	0,55	0,78	0,66	0,84	0,42
500	0,50	0,73	0,61	0,80	0,42
600	0,46	0,68	0,54	0,76	0,33
700	0,38	0,54	0,40	0,71	0,24
800	0,25	0,35	0,25	0,63	0,15
900	0,15	0,18	0,13	0,45	0,15
1000	0,07	0,08	0,08	0,20	0,20
1100	0,05	0,06	0,05	0,10	-
Austeniittinen II 1.4401, 1.4404, 1.4541					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,86	1,13	0,87	0,96	0,56
200	0,72	0,98	0,80	0,92	0,42
300	0,67	0,92	0,78	0,88	0,42
400	0,62	0,85	0,77	0,84	0,42
500	0,60	0,82	0,74	0,80	0,42
600	0,56	0,75	0,67	0,76	0,33
700	0,50	0,68	0,51	0,71	0,24
800	0,41	0,50	0,34	0,63	0,15
900	0,22	0,26	0,19	0,45	0,15
1000	0,14	-	0,10	0,20	0,20
1100	0,07	-	0,07	0,10	-
Austeniittinen III 1.4571					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,89	1,16	0,88	0,96	0,56
200	0,82	1,07	0,81	0,92	0,42
300	0,77	1,01	0,79	0,88	0,42
400	0,72	0,95	0,79	0,84	0,42
500	0,69	0,91	0,77	0,80	0,42
600	0,65	0,85	0,71	0,76	0,33
700	0,59	0,76	0,57	0,71	0,24
800	0,51	0,63	0,38	0,63	0,15
900	0,29	0,38	0,23	0,45	0,15
1000	0,15	0,18	0,10	0,20	0,20
Duplex I 1.4362, 1.4062, 1.4482					
20	1,00	1,15	1,00	1,00	1,00
100	0,83	0,94	0,94	0,96	1,00
200	0,75	0,82	0,87	0,92	1,00
300	0,69	0,77	0,79	0,88	1,00
400	0,58	0,70	0,70	0,84	1,00
500	0,43	0,59	0,59	0,80	1,00
600	0,27	0,45	0,47	0,76	1,00
700	0,14	0,28	0,33	0,71	0,80
800	0,07	0,14	0,20	0,63	0,60
900	0,04	0,05	0,09	0,45	0,40

Taulukko 8.1 *(jatkuu) Lujuuden, jäykkyyden ja venymän pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa*

Lämpötila θ (°C)	Pienennystekijä $k_{p0,2,\theta}$	Pienennystekijä $k_{2,\theta}$	Pienennystekijä $k_{u,\theta}$	Pienennystekijä $k_{E,\theta}$	Pienennystekijä $k_{\varepsilon u,\theta}$
Duplex II 1.4462, 1.4162, 1.4662					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,82	0,96	0,96	0,96	0,87
200	0,70	0,86	0,91	0,92	0,74
300	0,65	0,82	0,88	0,88	0,74
400	0,60	0,76	0,82	0,84	0,74
500	0,53	0,67	0,71	0,80	0,74
600	0,42	0,55	0,56	0,76	0,74
700	0,27	0,37	0,38	0,71	0,44
800	0,15	0,21	0,22	0,63	0,14
900	0,07	0,11	0,14	0,45	0,14
1000	0,01	0,03	0,06	0,20	0,14
Ferriittinen I 1.4509, 1.4521, 1.4621					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,88	1,01	0,93	0,98y	1,00
200	0,83	0,99	0,91	0,95	1,00
300	0,78	0,92	0,88	0,92	1,00
400	0,73	0,90	0,82	0,86	0,75
500	0,66	0,86	0,78	0,81	0,75
600	0,53	0,71	0,64	0,75	0,75
700	0,39	0,48	0,41	0,54	0,75
800	0,10	0,13	0,11	0,33	0,75
900	0,04	0,04	0,03	0,21	0,75
1000	0,02	0,02	0,01	0,09	0,75
Ferriittinen II 1.4003, 1.4016					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,93	1,12	0,93	0,98	1,00
200	0,91	1,09	0,89	0,95	1,00
300	0,89	1,04	0,87	0,92	1,00
400	0,87	1,08	0,84	0,86	0,75
500	0,75	1,01	0,82	0,81	0,75
600	0,43	0,48	0,33	0,75	0,75
700	0,16	0,18	0,13	0,54	0,75
800	0,10	0,12	0,09	0,33	0,75
900	0,06	0,09	0,07	0,21	0,75
1000	0,04	0,06	0,05	0,09	0,75

8.3 Rakenteellisen palonkestävyyden määrittäminen

8.3.1 Yleistä

Rakenteiden palonkestävyys voidaan määrittää jollakin seuraavista menetelmistä tai niitä yhdistämällä:

- yksinkertaistettuja laskentamenetelmiä, jota sovelletaan yksittäisiin sauvoihin;
- tarkennettuja laskentamenetelmiä;
- kokeellinen mitoitus.

Yksinkertaistetut laskentamenetelmät perustuvat varmalla puolella oleviin oletuksiin. Tarkennetuilla laskentamenetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joissa sovelletaan rakenteiden mekaniikan ja lujuusopin periaatteita realistisella tavalla tarkasteltavassa tapauksessa. Mikäli yksinkertaistettua laskentamallia ei esitetä, käytetään joko tarkennettua laskentamenetelmää tai kokeisiin perustuvaa menetelmää.

Standardissa EN 1993-1-2 oletetaan, että hiiliteräksille esitettyjä yksinkertaisia laskentasääntöjä sovelletaan myös ruostumattomille teräksille. Osa laskentasäännöistä on kuitenkin osoitettu olevan hyvin konservatiivisia ruostumattomille teräksille ja oletetaan, että muutetut suunnittelusäännöt, jotka on esitetty kohdassa 8.3 sisällytetään standardiin EN 1993-1-2 seuraavassa revisiossa. Muutokset ovat seuraavat:

1. Käytetään lujuutta $f_{\mathrm{p0,2,\theta}}$ (lujuuden $f_{2,\theta}$sijasta) määritettäessä:
   - pilareiden nurjahduskestävyys (kaikissa poikkileikkausluokissa)
   - tuettujen palkkien taivutuskestävyys poikkileikkausluokassa 4
   - tukemattomien palkkien taivutuskestävyys (kaikissa poikkileikkausluokissa).
2. Käytetään lämpötilasta riippuvaa arvoa parametrille ε poikkileikkausluokituksen määrittämiseksi
3. Käytetään huoneenlämpötilan nurjahduskäyriä pilareille ja tukemattomille palkeille

8.3.2 Poikkileikkausluokitus

Paloteknisessä mitoituksessa luvun 5 mukaista poikkileikkausluokitusta sovelletaan siten, että poikkileikkausluokka määritetään huoneenlämpötilan mukaan käyttäen tarkasteltavassa lämpötilassa määritettyä arvoa suureelle ε:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{\mathrm{E,\theta}}}{k_{\mathrm{y,\theta}}}\right]^{0,5} \tag{8.6}$$

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää konservatiivista lämpötilassa 20°C määritettyä arvoa suureelle ε:

$$\varepsilon = 0{,}85 \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} \tag{8.7}$$

missä:

$k_{\mathrm{y,\theta}}$ on joko $k_{\mathrm{p0,2,\theta}}$ tai $k_{2,\theta}$, ottaen huomioon kuormituksen tyyppi ja poikkileikkausluokka (ks. kohta 8.2).

8.3.3 Vedetyt sauvat

Vetokestävyyden mitoitusarvo $N_{\mathrm{fi,\theta,Rd}}$, kun lämpötila sauvassa θ_{a} on tasan jakaantunut, lasketaan kaavasta:

$$N_{\mathrm{fi,\theta,Rd}} = k_{2,\theta}\, N_{\mathrm{Rd}} \left[\gamma_{\mathrm{M0}}/\gamma_{\mathrm{M,fi}}\right] \tag{8.8}$$

missä:

$k_{2,\theta}$ lujuuden pienennystekijä, joka vastaa 2 %:n kokonaisvenymää lämpötilassa θ_{a}

N_{Rd} on kohdan 5.7.2 mukainen poikkileikkauskestävyyden mitoitusarvo $N_{\mathrm{pl,Rd}}$ huoneenlämpötilassa.

γ_{M0} and $\gamma_{\mathrm{M,fi}}$ ovat taulukon 4.1 ja luvun 8.1 mukaisia osavarmuuslukuja.

Jos sauvan lämpötilajakautuma on epätasainen, kestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta:

$$N_{\mathrm{fi,t,Rd}} = \sum_{i=1}^{n} A_{\mathrm{i}}\, k_{2,\theta_{\mathrm{i}}}\, f_{\mathrm{y}} \,/\, \gamma_{\mathrm{M,fi}} \tag{8.9}$$

missä:

A_{i} on poikkileikkausosan i pinta-ala

θ_{i} on poikkileikkauksen osan A_{i} lämpötila

$k_{2,\theta_{\mathrm{i}}}$ on pienennystekijä, joka vastaa 2 % :n kokonaisvenymän mukaista lujuusarvoa lämpötilassa θ_{i} (kts. kohta 8.2).

Vaihtoehtoisesti vetokestävyyden mitoitusarvo $N_{\mathrm{fi,t,Rd}}$ ajanhetkellä t jakaantunutta lämpötilaa θ vastaava arvo $N_{\mathrm{fi,\theta,Rd}}$ joka lasketaan ajanhetkellä *t* suurimman lämpötilan θ_{max} mukaan.

8.3.4 Puristetut sauvat

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{\mathrm{b,fi,t,Rd}}$ ajan hetkellä *t,* kun lämpötila θ on tasan jakaantunut, lasketaan kaavasta:

$$N_{\mathrm{b,fi,t,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \tag{8.10}$$

$$N_{\mathrm{b,fi,t,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{fi}}\, A_{\mathrm{eff}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \tag{8.11}$$

missä:

$k_{\mathrm{p0,2,\theta}}$ on 0,2 % -rajaa vastaavan lujuuden pienennyskertoimen arvo lämpötilassa θ (kts. kohta 8.2).

χ_{fi} on pienennystekijä taivutusnurjahduksessa palotilanteessa, joka lasketaan kaavasta:

$$\chi_{\mathrm{fi}} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^{\,2} - \bar{\lambda}_{\theta}^{\,2}}} \qquad \text{mutta } \chi_{\mathrm{fi}} \leq 1 \tag{8.12}$$

missä:

$$\phi_{\theta} = 0{,}5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{0}) + \bar{\lambda}_{\theta}^{\,2}\right] \tag{8.13}$$

missä α ja $\bar{\lambda}_0$ ovat taulukoissa 6.1 ja 6.2 annetut huoneenlämpötilaa vastaavat nurjahdustekijät.

Dimensioton hoikkuus $\bar{\lambda}_\theta$ lämpötilassa θ lasketaan kaavasta:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\left[\frac{k_{\mathrm{p0,2,\theta}}}{k_{\mathrm{E,\theta}}}\right]^{0,5} \qquad \text{kaikille poikkileikkausluokille} \qquad (8.14)$$

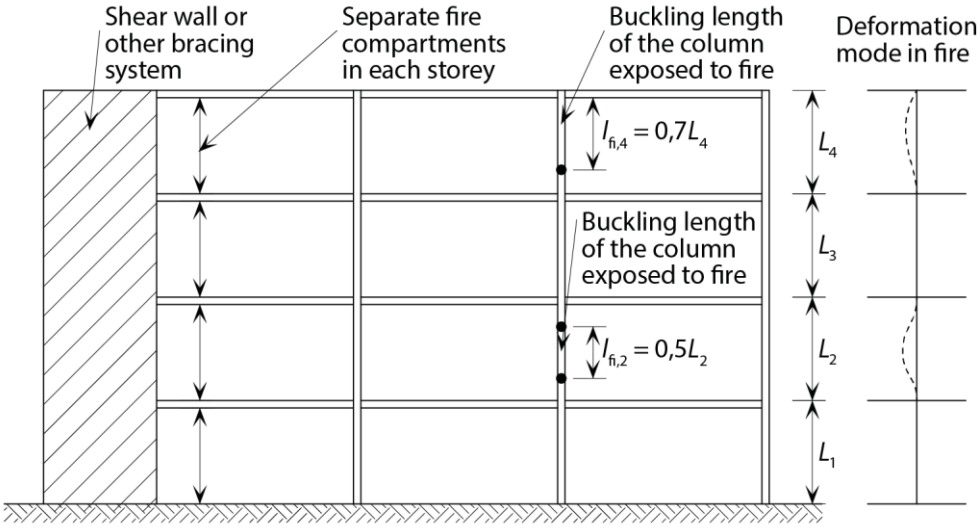
missä:

$k_{\mathrm{E,\theta}}$ on lineaarisen alkukimmokertoimen pienennystekijä lämpötilassa θ (ks. kohta 8.2).

Kun sauvan lämpötila on epätasainen, puristuskestävyys voidaan laskea käyttämällä tasan jakaantunutta lämpötilaa, joka vastaa sauvan suurinta lämpötilaa. Menetelmä on varmalla puolella.

Pilarin nurjahduspituus palotilanteessa määritetään yleensä samalla tavalla kuin huoneenlämpötilassa. Sivusuunnassa tuetuissa kehissä pilarin nurjahduspituus l_{fi} voidaan laskea tarkastelemalla pilaria päistään kiinnitettynä siinä suunnassa, jossa pilari liittyy ylä- ja alapuolisten palo-osastojen pilareihin jäykästi tai osittain jäykästi edellyttäen, että em. palo-osastoja eristävien rakenneosien palonkestävyys on vähintään tarkasteltavan pilarin palonkestävyyden suuruinen

Sivusuunnassa tuetuissa kehissä, joissa jokainen kerros muodostaa erillisen palo-osaston, johon liittyvillä rakenteilla on riittävä palonkesto, välikerroksen pilarien nurjahduspituutena käytetään arvoa $l_{\mathrm{fi}} = 0{,}5L$ ja ylimmän kerroksen pilarien nurjahduspituutena arvo $l_{\mathrm{fi}} = 0{,}7L$, missä L on tarkasteltavan kerroksen systeemi-korkeus, ks. kuva 8.1.



Kuva 8.1 *Sivusuunnassa tuettujen kehien pilarien nurjahduspituudet l_{fi}*

8.3.5 Sivusuunnassa tuetut sauvat

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{\mathrm{fi,\theta,Rd}}$ kun poikkileikkauksen lämpötila θ_{a} on vakio, lasketaan kaavasta:

$$M_{\mathrm{fi,\theta,Rd}} = k_{2,\theta}\, M_{\mathrm{Rd}}\left[\frac{\gamma_{\mathrm{M0}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}\right] \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \qquad (8.15)$$

$$M_{\mathrm{fi,\theta,Rd}} = k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, M_{\mathrm{Rd}} \left[\frac{\gamma_{\mathrm{M0}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}\right] \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \qquad (8.16)$$

missä:

M_{Rd} on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys $M_{\mathrm{pl,Rd}}$ (poikkileikkausluokissa 1 ja 2), poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys $M_{\mathrm{el,Rd}}$ (poikkileikkausluokassa 3) tai tehollisen poikkileikkauksen taivutuskestävyys $M_{\mathrm{eff,Rd}}$ (poikkileikkausluokassa 4) huoneenlämpötilassa;

$k_{2,\theta}\ ja\ k_{\mathrm{p0,2,\theta}}$ on määritetty kohdassa 8.2.

Tarvittaessa normaalilämpötilan mukaisia taivutuskestävyyden arvoja pienennetään leikkausvoiman takia kohdan 5.7.6 mukaan.

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{\mathrm{fi,t,Rd}}$ ajanhetkellä t, kun lämpötilajakaantuma on epätasainen, lasketaan kaavasta (menettely on varmalla puolella):

$$M_{\mathrm{fi,t,Rd}} = \left[\frac{M_{\mathrm{fi,\theta,Rd}}}{\kappa_1 \kappa_2}\right] \qquad (8.17)$$

missä:

$M_{\mathrm{fi,\theta,Rd}}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (tai tehollinen mitoitusarvo poikkileikkausluokassa 4), kun tasan jakaantuneen lämpötilan θ_{a} arvoksi valitaan poikkileikkauksen suurin lämpötila

κ_1 on adaptaatiokerroin vastaten poikkileikkauksen epätasaista lämpötilajakaantumaa, ks. taulukko 8.2

κ_2 on adaptaatiokerroin, joka ottaa huomioon epätasaisen lämpötilajakaantumisen palkin pituussuunnassa, ks. taulukko 8.2.

Taulukko 8.2 *Adaptaatiokertoimet*

Paloaltistusolosuhde	κ_1
Palkki, joka on palolle altis kaikilta neljältä sivulta	1,0
Suojaamaton palkki, johon palo kohdistuu kolmelta sivulta ja neljännen sivun päällä on liitto- tai betonilaatta	0,70
Suojattu palkki, johon palo kohdistuu kolmelta sivulta ja neljännen sivun päällä on liitto- tai betonilaatta	0,85
	κ_2
Staattisesti määräämättömien palkkien tuet	0,85
Kaikki muut tapaukset	1,0

Leikkauskestävyyden mitoitusarvo $V_{\mathrm{fi,t,Rd}}$ ajanhetkellä t, kun poikkileikkauksen lämpötilajakaantuma on epätasainen, lasketaan kaavasta:

$$V_{\mathrm{fi,t,Rd}} = k_{2,\theta_{\mathrm{web}}}\, V_{\mathrm{Rd}} \left[\frac{\gamma_{\mathrm{M0}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}\right] \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \qquad (8.18)$$

$$V_{\mathrm{fi,t,Rd}} = k_{\mathrm{p0,2,\theta_{web}}}\, V_{\mathrm{Rd}} \left[\frac{\gamma_{\mathrm{M0}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}\right] \qquad \text{poikkileikkausluokassa 4} \qquad (8.19)$$

missä:

V_{Rd} on poikkileikkauksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo huoneen lämpötilassa kohdan 5.7.5 mukaan (kun lämpötila on suurempi kuin 400°C, η arvo on 1,0).

θ_{web} on poikkileikkauksen uuman lämpötila.

8.3.6 Sivusuunnassa tukemattomat palkit

Sivusuunnassa tukemattoman sauvan kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{\mathrm{b,fi,t,Rd}}$ ajanhetkellä t lasketaan kaavasta:

$$M_{\mathrm{b,fi,t,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{LT,fi}}\, W_{\mathrm{pl,y}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{poikkileikkausluokissa 1 ja 2} \qquad (8.20)$$

$$M_{\mathrm{b,fi,t,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{LT,fi}}\, W_{\mathrm{el,y}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 3} \qquad (8.21)$$

$$M_{\mathrm{b,fi,t,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{LT,fi}}\, W_{\mathrm{eff,y}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \qquad \text{poikkileikkausluokassa 3} \qquad (8.22)$$

missä:

$\chi_{\mathrm{LT,fi}}$ on kiepahduksen pienennystekijä palotilanteessa, joka lasketaan kaavasta:

$$\chi_{\mathrm{LT,fi}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{LT,\theta}} + \sqrt{\phi_{\mathrm{LT,\theta}}^{\,2} - \bar{\lambda}_{\mathrm{LT,\theta}}^{\,2}}} \qquad \text{mutta } \chi_{\mathrm{LT,fi}} \leq 1 \qquad (8.23)$$

$$\phi_{\mathrm{LT,\theta}} = 0{,}5\left[1 + \alpha_{\mathrm{LT}}(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT,\theta}} - 0{,}4) + \bar{\lambda}_{\mathrm{LT,\theta}}^{\,2}\right] \qquad (8.24)$$

missä

α_{LT} on luvun 6.4.2 mukainen epätäydellisyystekijä huoneenlämpötilassa

$k_{\mathrm{p0,2,\theta}}$ on luvun 8.2 mukainen pienennystekijä vastaten poikkileikkauksen suurinta lämpötilaa θ.

Dimensioton hoikkuus $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT,\theta}}$ lämpötilassa θ lasketaan kaavasta:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT,\theta}} = \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} \left[\frac{k_{\mathrm{p0,2,\theta}}}{k_{\mathrm{E,\theta}}}\right]^{0,5} \qquad \text{kaikissa poikkileikkausluokissa} \qquad (8.25)$$

missä:

$k_{\mathrm{E,\theta}}$ on luvun 8.2 mukainen pienennystekijä lämpötilassa θ..

8.3.7 Sauvat, joihin kohdistuu aksiaalinen puristus ja taivutus

Aksiaalisten puristusvoimien ja taivutusmomenttien yhteisvaikutus tarkistetaan seuraavien ehtojen mukaisesti (heikomman tai vahvemman akselin suhteen tapahtuvan nurjahduksen ja kiepahduksen estämiseksi):

a) Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3:

$$\frac{N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{min,fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} + \frac{k_{\mathrm{y}}\, M_{\mathrm{y,fi,Ed}}}{M_{\mathrm{y,fi,\theta,Rd}}} + \frac{k_{\mathrm{z}}\, M_{\mathrm{z,fi,Ed}}}{M_{\mathrm{z,fi,\theta,Rd}}} \leq 1 \tag{8.26}$$

$$\frac{N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{min1,fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} + \frac{k_{\mathrm{LT}}\, M_{\mathrm{y,fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{LT,fi}}\, M_{\mathrm{y,fi,\theta,Rd}}} + \frac{k_{\mathrm{z}}\, M_{\mathrm{z,fi,Ed}}}{M_{\mathrm{z,fi,\theta,Rd}}} \leq 1 \tag{8.27}$$

missä:

$N_{\mathrm{fi,Ed}}$, $M_{\mathrm{y,fi,Ed}}$ ja $M_{\mathrm{z,fi,Ed}}$ ovat aksiaalinen kuorma ja taivutusmomentit palotilanteessa;

$M_{\mathrm{y,fi,\theta,Rd}}$ ja $M_{\mathrm{z,fi,\theta,Rd}}$ määritetään luvussa 8.3.5

$\chi_{\mathrm{min,fi}}$ on pienin pienennystekijä taivutus-, vääntö- tai taivutusvääntönurjahduksessa lämpötilassa θ, kohdan 8.3.4 mukaan

$\chi_{\mathrm{min1,fi}}$ on pienin pienennystekijän arvo seuraavissa tapauksissa: taivutusnurjahdus z-akselin suhteen, vääntönurjahdus tai taivutusvääntönurjahdus lämpötilassa θ, kohdan 8.3.4 mukaan

$\chi_{\mathrm{LT,fi}}$ on kiepahduksen pienennystekijä lämpötilassa θ kohdan 7.4.5 mukaan.

$$k_{\mathrm{LT}} = 1 - \frac{\mu_{\mathrm{LT}}\, N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{z,fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} \leq 1 \tag{8.28}$$

$$\mu_{\mathrm{LT}} = 0{,}15\bar{\lambda}_{\mathrm{z,\theta}}\, \beta_{\mathrm{M,LT}} - 0{,}15 \leq 0{,}9 \tag{8.29}$$

$$k_{\mathrm{y}} = 1 - \frac{\mu_{\mathrm{y}}\, N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{y,fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} \leq 3 \tag{8.30}$$

$$\mu_{\mathrm{y}} = \left(1{,}2\beta_{\mathrm{M,y}} - 3\right)\bar{\lambda}_{\mathrm{y,\theta}} + 0{,}44\beta_{\mathrm{M,y}} - 0{,}29 \leq 0{,}8 \tag{8.31}$$

$$k_{\mathrm{z}} = 1 - \frac{\mu_{\mathrm{z}}\, N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{z,fi}}\, A\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} \leq 3 \tag{8.32}$$

$$\mu_{\mathrm{z}} = (2\beta_{\mathrm{M,z}} - 5)\bar{\lambda}_{\mathrm{z,\theta}} + 0{,}44\beta_{\mathrm{M,z}} - 0{,}29 \leq 0{,}8 \text{ ja } \bar{\lambda}_{\mathrm{z,\theta}} \leq 1{,}1 \tag{8.33}$$

β_{M} on taulukon 8.3 mukainen ekvivalentin tasaisen momentin tekijä.

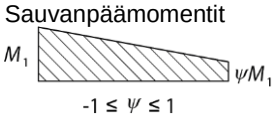
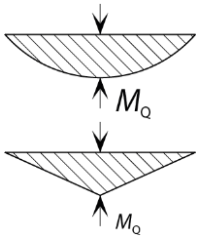
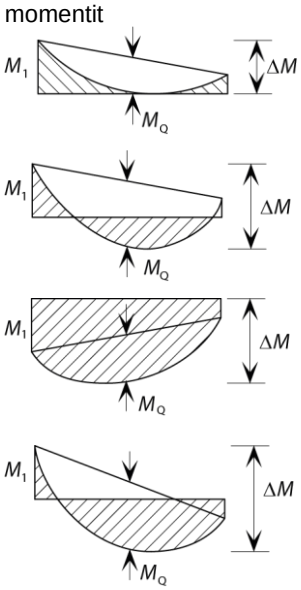
b) Poikkileikkausluokassa 4

$$\frac{N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{min,fi}}\, A_{\mathrm{eff}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} + \frac{k_{\mathrm{y}}\, M_{\mathrm{y,fi,Ed}} + N_{\mathrm{fi,Ed}}\, e_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{y,fi,\theta,Rd}}} + \frac{k_{\mathrm{z}}\, M_{\mathrm{z,fi,Ed}} + N_{\mathrm{fi,Ed}}\, e_{\mathrm{z}}}{M_{\mathrm{z,fi,\theta,Rd}}} \leq 1 \tag{8.34}$$

$$\frac{N_{\mathrm{fi,Ed}}}{\chi_{\mathrm{min1,fi}}\, A_{\mathrm{eff}}\, k_{\mathrm{p0,2,\theta}}\, \dfrac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}}} + \frac{k_{\mathrm{LT}}\, M_{\mathrm{y,fi,Ed}} + N_{\mathrm{fi,Ed}}\, e_{\mathrm{y}}}{\chi_{\mathrm{LT,fi}}\, M_{\mathrm{y,fi,\theta,Rd}}} + \frac{k_{\mathrm{z}} M_{\mathrm{z,fi,Ed}} + N_{\mathrm{fi,Ed}}\, e_{\mathrm{z}}}{M_{\mathrm{z,fi,\theta,Rd}}} \leq 1 \qquad (8.35)$$

missä termit ovat edellisen kohdan (a) mukaisia paitsi, että k_y, k_z ja k_{LT} arvoja laskettaessa, A_g korvataan arvolla A_{eff}.

Taulukko 8.3 *Ekvivalentin tasaisen momentin tekijät, β_M*

Momenttikuvio	
Sauvanpäämomentit 	$\beta_{\mathrm{M,\psi}} = 1{,}8 - 0{,}7\psi$
Poikittaisen kuormituksen aiheuttaman momentit tasossa 	$\beta_{\mathrm{M,Q}} = 1{,}3$ $\beta_{\mathrm{M,Q}} = 1{,}4$
Poikittaisen kuormituksen aiheuttamat momentit tasossa sekä sauvanpää-momentit 	$\beta_{\mathrm{M}} = \beta_{\mathrm{M,\psi}} + \frac{M_{\mathrm{Q}}}{\Delta M}(\beta_{\mathrm{M,Q}} - \beta_{\mathrm{M,\psi}})$ $M_{\mathrm{Q}} = \lvert \max M \rvert$ vain kuormituksesta Momenttikuviot, kun momentin merkki ei muutu: $\Delta M = \lvert \max M \rvert$ Momenttikuviot, kun momentin merkki muuttuu: $\Delta M = \lvert \max M \rvert + \lvert \min M \rvert$

8.4 Termiset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa

8.4.1 Lämpöpiteneminen

Ruostumattoman austeniittisen teräksen lämpöpiteneminen $\Delta l / l$ lasketaan kaavasta:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(16 + 4{,}79 \times 10^{-3}\theta - 1{,}243 \times 10^{-6}\theta^2) \times (\theta - 20)}{10^6} \qquad (8.36)$$

missä:

l on pituus lämpötilassa 20°C

Δl on lämpötilan aiheuttama piteneminen

θ on teräksen lämpötila (°C)

Taulukossa 8.4 esitetään lämpölaajenemiskertoimen arvot austeniittisille, duplex ja ferriittisille ruostumattomille teräksille eri lämpötila-alueilla.

Taulukko 8.4 *Keskimääräinen lämpölaajenemiskertoimen arvo*

Teräksen Lämpötila-alue (°C)	Keskimääräinen lämpölaajenemiskerroin (10^{-6}/°C)		
	Austeniittinen	Duplex	Ferriittinen
20 – 100	16,7	13,2	10,3
20 – 200	17,2	13,9	10,7
20 – 300	17,7	14,3	11,1
20 – 400	18,1	14,7	11,5
20 – 500	18,4	15,1	11,8
20 – 600	18,8	15,4	12,0
20 – 700	19,1	15,9	12,4
20 – 800	19,4	16,3	12,9
20 – 900	19,4	16,7	13,4
20 – 1000	19,7	17,1	14,0
20 – 1100	20	17,5	-

8.4.2 Ominaislämpö

Ruostumattoman teräksen ominaislämpö c_a lasketaan kaavasta:

Austeniittisille ja duplex ruostumattomille teräksille:

$$c = 450 + 0{,}28 \times \theta - 2{,}91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1{,}34 \times 10^{-7}\theta^3 \quad \text{J/kg°C} \qquad (8.37)$$

Ferriittisille ruostumattomille teräksille:

$$c = 430 + 0{,}26 \times \theta \quad \text{J/kg°C} \qquad (8.38)$$

Standardissa EN 1993-1-2 voimassa olevassa versiossa esitetään ainoastaan kaava (8.37). On oletettavaa, että kaava (8.38) lisätään standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

8.4.3 Lämmönjohtavuus

Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus λ_a lasketaan kaavasta:

Austeniittisille ja duplex-ruostumattomille teräksille:

$$\lambda = 14{,}6 + 1{,}27 \times 10^{-2}\theta \quad \text{W/m°C} \qquad (8.39)$$

Ferriittisille ruostumattomille teräksille:

$$\lambda = 20{,}4 + 2{,}28 \times 10^{-2}\theta - 1{,}54 \times 10^{-5}\theta^2 \qquad \text{W/m°C} \qquad (8.40)$$

Standardissa EN 1993-1-2 voimassa olevassa versiossa esitetään ainoastaan kaava (8.37). On oletettavaa, että kaava (8.38) lisätään standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

8.4.4 Lämpötilan nousun laskeminen ruostumattomalle teräkselle

Lämpötilan nousun laskemiseksi tarkoitettu menetelmä sopii sekä hiiliteräksille että ruostumattomille teräksille.

Tasaisesti lämmitetyn suojaamattoman ruostumattomasta teräksestä tehdyn sauvan poikkileikkauksen lämpötilan nousu ajanjakson *t* aikana lasketaan kaavasta:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c\,\rho}\,\dot{h}_{net,d}\,\Delta t \qquad (8.41)$$

missä:

- c on ruostumattoman teräksen ominaislämpö kohdan 8.4.2 mukaan, (J/kgK)
- ρ on ruostumattoman teräksen ominaislämpö taulukon 2.7 mukaan (yleensä arvo on lämpötilasta riippumaton)
- A_m/V on suojaamattoman profiilin poikkileikkaustekijä
- A_m sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti
- V on sauvan tilavuus sauvan pituusyksikköä kohti
- $\dot{h}_{net,d}$ on pinta-alayksikköä kohti laskettu nettolämpövuon mitoitusarvo

$$= \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \qquad (8.42)$$

missä:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_g - \theta) \qquad (8.43)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi\,\varepsilon_{res}\,5{,}67 \times 10^{-8}\left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4\right] \qquad (8.44)$$

- α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin (yleensä käytetään arvoa 25W/m^{2}K)
- θ_g on sauvaa ympäröivän palokaasun lämpötila nimellisen lämpötila-aika-käyrän mukaan (°C);
- θ on teräksen lämpötila, joka oletetaan vakioksi ajanhetkellä t (°C)
- ϕ on näkyvyyskerroin
- ε_{res} on resultoiva emissiviteetti.

Parametri ε_{res} tarkoittaa tulipalon ja ruostumattoman teräspinnan välistä lämpösäteilyä ja sen suuruus riippuu siitä, miten suoraan rakenneosa on tulipalolle altis. Tulipalon säteilyvaikutuksilta osittain suojatuilla rakenneosilla on pienempi ε_{res}. Varmalla puolella olevana arvona voidaan käyttää arvoa ε_{res} = 0,4.

Edellä esitettyä yhtälöä voidaan käyttää teräksen lämpötilan laskemiseksi asteittain, mikäli palon lämpötila-aikariippuvuus tunnetaan. EN 1991-2-2:n mukaan ns. standardipalokäyrän lämpötila-aikariippuvuus lasketaan kaavasta:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)) \tag{8.45}$$

missä:

t on kulunut aika (minuuteissa)

8.5 Materiaalimallit korkeissa lämpötiloissa

Jännitys-venymä-kuvaaja korkeissa lämpötiloissa voidaan laskea seuraavilla kaavoilla. On huomattava, että liitteessä C esitetään vastaavat kaavat jännitys-venymä-kuvaajan mallintamiseksi huoneenlämpötilassa.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_\theta} + 0{,}002\left[\frac{\sigma}{f_{p0,2,\theta}}\right]^{n_\theta} \qquad \text{kun } \sigma \le f_{p0,2,\theta} \tag{8.46}$$

Seuraavassa vaiheessa jännitys-venymä-kuvaaja voidaan esittää perustuen joko $f_{2,\theta}$ (kaava (8.47) tai $f_{u,\theta}$ (kaava (8.48)):

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left(0{,}02 - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{(f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta})}{E_{p0,2,\theta}}\right) \times \left[\frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta}}\right]^{m_{\theta,2}} + \varepsilon_{p0,2,\theta}$$

$$\text{kun} \quad f_{p0,2,\theta} < \sigma \le f_{u,\theta} \tag{8.47}$$

tai

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \varepsilon_{u,\theta}\left(\frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}}\right)^{m_\theta} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{kun} \quad f_{p0,2,\theta} < \sigma \le f_{u,\theta} \tag{8.48}$$

missä

σ on insinöörijännitys

ε on insinöörivenymä

$f_{2,\theta}$ on jännitys vastaten 2 % kokonaisvenymää lämpötilassa θ

$\varepsilon_{p0,2,\theta}$ on kokonaisvenymä vastaten $f_{p0,2,\theta}$

$E_{p0,2,\theta}$ on tangenttimoduli vastaten $f_{p0,2,\theta}$

$\varepsilon_{u,\theta}$ on venymä vastaten murtolujuutta $f_{u,\theta}$ ($\varepsilon_{u,\theta} \le \varepsilon_u$)

n_θ, m_θ and $m_{\theta,2}$ ovat eksponentteja, jotka määrittävät materiaalin epälineaarisuuden lämpötilassa θ

$\varepsilon_{u,\theta}$ voidaan määrittää huoneenlämpötilassa sovellettavalla yhtälöllä termille ε_u liitteen C mukaisesti ja käyttämällä korkean lämpötilan lujuuksia.

Termille n_θ voidaan käyttää termin n arvoja huoneenlämpötilassa. Termeille m_θ ja $m_{\theta,2}$ voidaan käyttää samoja yhtälöitä kuin termille m mutta korkean lämpötilan arvoja $f_{p0,2,\theta}$ ja $f_{u,\theta}$.

Standardin EN 1993-1-2 nykyversiossa esitetään erilainen materiaalimalli kuin edellä esitetty. Oletetaan, että yhtälöiden (8.46), (8.47) ja (8.48) mukainen materiaalimalli esitetään standardin EN 1993-1-2 seuraavassa revisiossa. Yhtälöt on muunnettu Ramberg-Osgood-yhtälöstä ja ovat siten yhdenmukaisia

huoneenlämpötilan materiaalimallin kanssa (Liite C). Uusi materiaalimalli on entistä tarkempi ja helppokäyttöisempi, koska siinä käytetään parametreja, joilla on selkeä fysikaalinen merkitys.

9 VÄSYMINEN

Rakenteissa tai niiden osissa, joihin kohdistuu merkittäviä jännitysvaihteluja, väsyminen otetaan huomioon. Rakennuksia ei yleensä tarvitse mitoittaa väsymiselle lukuun ottamatta seuraavia tapauksia: nostolaitteita, liikkuvia pyöräkuormia ja värähteleviä koneita tukevat rakenteet ja tuulen takia värähtelevät rakenneosat.

Kuten hiiliteräkselläkin jännityskeskittymien ja hitsausvirheiden yhteisvaikutus aiheuttaa lähes välttämättä rakenteeseen kohtia, jotka ovat enemmän alttiit väsymiselle kuin rakenteen muut osat. Hiiliteräksestä tehdyille rakenteille laaditut ohjeet väsymiskestävyyden arvioimiseksi soveltuvat myös austeniittisille ja duplex-ruostumattomista teräksistä tehdyille rakenteille, ks. EN 1993-1-9.

Hyvällä suunnittelulla voidaan merkittävästi pienentää rakenteiden väsymisherkkyyttä. Tämä edellyttää rakenteen yleisen muodon ja väsymiselle alttiiden rakenneyksityiskohtien järkevää ja huolellista valintaa. On oleellista, että väsyminen otetaan huomioon suunnittelun alkuvaiheessa. Jos väsyminen otetaan huomioon vasta muun suunnittelun jälkeen, se voi johtaa huonoon tai kalliiseen rakenteeseen. Tärkeää on ottaa huomioon myös valmistuksen ja asennuksen asettamat vaatimukset. Em. seikkojen takia on suositeltavaa, että aikaisessa vaiheessa tunnistetaan kohdat, jotka ovat eniten alttiit väsymiselle (säröjen syntyminen) ja päätetään tarvittavista erityistoimenpiteistä ottaen huomioon myös valmistus ja asennus. Erityisesti valmistusta ja asennusta helpottavien reikien tai nostoa varten tehtyjen kiinnitysten vaikutus väsymiskestävyyteen tulee ottaa huomioon.

Potentiaaliset väsymisongelmat voidaan mahdollisesti eliminoida välttämällä seuraavia asioita rakenneyksityiskohtien suunnittelussa:

- Poikkileikkauksen jyrkät muutokset ja jännityskeskittymät yleensä
- Osien huono yhteensovitus ja epäkeskeisyydet
- Pienet epäjatkuvuudet kuten naarmut ja hiontajäljet
- Sekundääristen kiinnitysten tarpeeton hitsaus, kuten esim. nostokorvakkeet
- Osittain läpihitsatut hitsit, pienahitsit, epäjatkuvat hitsit ja hitsaustuet
- Hitsien sytytysjäljet.

Vaikka väsymiskestävyyden parannusmenetelmät, kuten hitsin geometrian kontrollointi, hitsin juuren hiominen, raepuhallus ja vasarointi, voivat parantaa liitoksen väsymiskestävyyttä, ei ole olemassa riittäviä tietoja mahdollisten etujen määrittämisestä ruostumattomilla teräksillä. Tulee myös ottaa huomioon, että em. tekniikat ovat työvoimavaltaisia ja vaativat erityisosaamista ja kokemusta maksimaalisen hyödyn saavuttamiseksi. Em. tekniikoita, erikoistapauksia lukuun ottamatta, ei tule pitää suunnitteluvaihtoehtoina.

10 KOKEELLINEN MITOITUS

10.1 Yleistä

Ruostumattoman teräksen testausta tai rakenneosan kokeellista mitoitusta saatetaan tarvita mm. seuraavista syistä.

- jos hyödynnetään sauvojen kylmämuokattujen nurkkien lujuuden kasvua (ks. kohta 2.2.1);
- jos sauvan geometria on annettujen soveltuvuusrajojen ulkopuolella (kuten kohdassa 5.2 annetut soveltuvuusrajat);
- jos rakenneosien tai komponenttien käyttö perustuu prototyyppitestaukseen;
- vaadittaessa vaatimuksenmukaisuuden osoittamista tuotannossa oleville tuotteille.

Hiiliteräksille kehitettyjä koestusmenetelmiä koskevia tavanomaisia toimenpiteitä ja vaatimuksia sekä koetulosten käsittelyohjeita sovelletaan myös ruostumattomasta teräksestä tehtyjen rakenteiden koestukseen. Yleisenä suosituksena on, että näitä ohjeita noudatetaan, ks. kohta 5.2 ja EN 1990 liite ja kohta 9 sekä EN 1993-1-3 liite A. Ruostumattomien terästen käyttäytyminen on kuitenkin erilainen, johon tulee kiinnittää enemmän huomiota. Seuraavassa esitetään joitakin lisäohjeita.

10.2 Jännitys-venymäkuvaajan määrittäminen

Kun tehdään vetokokeita ruostumattomilla koesauvoilla, suositellaan, että kuormitus johdetaan koesauvaan sen läpi kiinnitettyjen, leikkausvoiman kestävien tappien välityksellä. Näin varmistetaan koesauvan kuormittuminen aksiaalisesti ja siten jännitys-venymä-kuvaajan todellisen muodon määrittäminen ilman, että tapahtuu näennäinen ennenaikainen kuormituksen epäkeskisyyden aiheuttama myötääminen. Kuormituksen aksiaalisuus voidaan varmentaa koestamalla kimmoisen alueen kuormituksilla asettamalla venymämittari koesauvan erikohtiin. Koska ruostumattomilla teräksillä ilmenee anisotropiaa (jännitys-venymä-ominaisuudet ovat erilaiset pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden) siten, että poikittain valssaussuuntaa nähden on suurempi lujuus, on suositeltavaa, että koekappaleiden orientaatio otetaan asianmukaisesti huomioon. Ruostumattomilla teräksillä on voimakas venymänopeus riippuvuus; veto-ominaisuuksien varmentamiseksi samaa venymänopeutta kuin mitä käytetään terästehtaalla, suositellaan käytettäväksi.

10.3 Rakenneosien koestus

Rakenneosat suositellaan testattavaksi mahdollisimman täysimittakaavaisin kokein riippuen koestuslaitteista. Koekappaleet suositellaan valmistettavaksi käyttäen samaa valmistusprosessia kuin mitä käytetään lopullisessa tuotannossa. Hitsausta käytettäessä prototyyppi hitsataan samalla tavalla.

Koska ruostumaton teräs saattaa olla anisotrooppinen, suositellaan, että koekappaleet valmistetaan levystä tai arkista samasta suunnasta (valssaussuunta tai sitä vastaan kohtisuora suunta) kuin lopullinen tuote. Jos lopullinen suunta on

tuntematon tai sitä ei voida taata, voi olla tarpeellista tehdä kokeet molemmissa suunnissa ja valita pienemmän arvon antavat koetulokset. Muokkauslujitetulle materiaalille määritetään sekä veto- että puristuslujuudet kyseeseen tulevassa suunnassa. Koetuloksia verrataan ko. suunnan referenssilujuuteen.

Ruostumattomalla teräksellä on suurempi sitkeys ja muokkauslujittuminen on voimakkaampaa kuin hiiliteräksellä, minkä vuoksi koestuslaitteiden kuormitus-kyvyn tulee mahdollisesti olla suurempi kuin mitä vaaditaan vastaavan lujuusluokan hiiliteräksellä. Suuremman kuormituskyvyn lisäksi kuormituslaitteiden tulee sallia suuremmat muodonmuutokset koekappaleessa.

On huomattava, että koekappaleen suurilla koekuormilla virumisen vaikutukset tulevat merkittävimmiksi ja tämä voi aiheuttaa sen, että venymät tai siirtymät eivät stabiloidu kohtuullisessa ajassa.

11 VALMISTUS

11.1 Yleistä

Tämän luvun tarkoituksena on esittää suunnitteluinsinööreille ruostumattomien teräsrakenteiden valmistukseen liittyviä näkökulmia ja suositeltavia hyviä käytäntöjä. Näiden perusteella voidaan myös arvioida valmistajan soveltuvuutta työnsuorittamiseksi.

Ruostumattoman teräksen työstäminen ei ole vaikeaa. Kuitenkin, joitain eroavaisuuksia on verrattuna hiiliterästen työstämiseen ja niiltä osin ruostumattomia teräksiä käsitellään eri tavoin. Useat valmistus- ja liittämisprosessit ovat samanlaisia kuin käytetään hiiliteräksille, mutta ruostumattomien terästen erilaiset ominaisuudet edellyttävät erityistä huolellisuutta joissain kohdin. Tehokas yhteydenpito suunnittelijan ja valmistajan välillä jo projektin varhaisessa vaiheessa edesauttaa, että tarkoituksen mukaisia valmistus menettelyjä voidaan ottaa käyttöön.

Ensisijainen tavoite on säilyttää ruostumattoman teräksen korroosionkestävys. Erityistä huolellisuutta tulee noudattaa kaikissa vaiheissa varastoinnin, käsittelyjen ja työstämisen aikana, jotta minimoidaan näiden työvaiheiden itsensä korjaavan passiivikerroksen muodostumista heikentävät vaikutukset. Hitsatun alueen korroosionkestävyyden palauttamiseksi tulee kiinnittää erityistä huomiota. Vaikkakin varotoimet ovat välttämättömiä, ne ovat yksinkertaisia ja yleensä hyvän insinöörikäytännön mukaisia.

Erityisen tärkeää on säilyttää ruostumattoman teräksen hyvä pinnanlaatu valmistusprosessin ajan. Pinnassa olevat naarmut eivät normaalisti ole hyväksyttäviä ja yleensä niiden korjaaminen osoittautuu aikaa vieväksi ja kalliiksi. Hiiliteräsrakenteissa pintanaarmut voidaan peittää maalaamalla, mutta ruostumattomilla teräsrakenteilla näin voidaan menetellä hyvin harvoin.

On otettava huomioon, että kuumavalssattujen ruostumattomien profiilien saatavuus on huomattavasti rajatumpi verrattuna vastaaviin hiiliteräksestä valmistettuihin. Tämä on johtanut siihen, että kylmämuovattujen ja hitsattujen profiilien käyttö on normaalia yleisempää. On myös huomioitava, että johtuen rajallisesta särmäyspituudesta, särmäämällä valmistetaan vain lyhyitä pituuksia ja tämä johtaa näiden profiilien osalta jatkoksiin. Liitosten yksityiskohtien suunnittelussa otetaan huomioon ruuvien tarvitsema tila lähellä taivutussäteitä ja mahdolliset hitsausmuodonmuutoksista aiheutuvat ongelmat osien sovituksessa.

11.2 EN 1090 (osat) Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus

Ruostumattomien teräsrakenteiden valmistus ja asentamien tehdään standardin EN 1090 (osat) mukaisesti. Standardin EN 1090 (osat) mukaisesti valmistetut rakennustuotteet CE-merkitään, mikäli ne käytetään Euroopan talousalueella. Standardi EN 1090 osat 2 ja 3 kattavat kylmämuovatut ja kuumamuovatut austeniittiset, duplex ja ferriittiset ruostumattomat terästuotteet.

Standardin EN 1090 osassa 1 ”Vaatimukset *Rakenteellisen kokoonpanon vaatimusten mukaisuuden arviointiin*” esitetään toimenpiteet joilla valmistaja osoittaa valmistamansa tuotteen ominaisuudet (rakenteelliset ominaisuudet, joilla osoitetaan tuotteen soveltuvuus tiettyyn käyttöön).

Standardin EN 1090 osassa 2 esitetään tekniset vaatimukset teräsrakenteille. Tässä osassa eritellään teräsrakenteen toteutuksen vaatimukset, joilla voidaan varmistaa riittävät ominaisuudet mekaaniselle kestävyydelle ja stabiiliudelle, käytettävyydelle ja pitkäaikaiskestävyydelle. Osassa 2 määritetään toiminnalliset ominaisuudet kokoonpanoille, jotka valmistaja ilmoittaa osan 1 vaatimusten mukaisesti. Siinä esitetään tekniset vaatimukset rakenteille, jotka valmistetaan hiiliteräksistä- ja ruostumattomista teräksistä ja joissa voidaan käyttää kuumamuovattuja ja kylmämuovattuja tuotemuotoja. Osaa 2 sovelletaan rakenteellisiin kokoonpanoihin rakennuksissa ja muissa samanlaisissa rakenteissa.

11.3 Toteutusluokka

Toteutusluokka määritetään standardin EN 1993-1-1 normatiivisen liitteen C ja siihen liittyvien kansallisten valintojen mukaisesti. Käytössä on 4 toteutusluokkaa EXC4 - EXC1, joista EXC4 on vaativin ja EXC1 on matalin taso. Tärkein syy neljän toteutusluokan käyttämiseksi on, että siten rakenteen luotettavuus voidaan esittää rakenteen, kokoonpanon tai yksityiskohdan mahdollisen vaurion seuraamusten ja valmistuksen toteutuksen avulla. Standardin EN 1090-2 liitteessä A.3 on esitetty toteutusluokkakohtaiset vaatimukset valmistukselle konepajassa ja työmaalla. Teräsrakenteen valmistaja noudattaa toteutusluokkakohtaisia vaatimuksia laatimalla tietyt menettelyt valmistusprosessien ohjaamiseen, jotka menettelyt muodostavat osan sertifioitua tehtaan tuotannon laadunhallintajärjestelmää (FPC) teräsrakenteen CE-merkitsemiseksi. Konepajateollisuuden yritysten kyvykkyys valmistaa teräsrakenteita jakautuu yrityksen valmistusprosessin toteutusluokan perusteella. Toteutusluokka rajoittaa mitä teräsrakenteita yksittäinen konepaja voi valmistaa, esim. yritys, jonka FPC on sertifioitu toteutusluokkaan EXC2 voi valmistaa ainoastaan toteutusluokkien EXC1 ja EXC2 rakenteita. Asiakkaat, suunnittelijat ja pääurakoitsijat voivat käyttää toteutusluokkaa löytääkseen ne teräsrakenteita valmistavat yritykset, joiden laadunhallinta on riittävällä tasolla. Suunnittelijat voivat käyttää toteutusluokkaa määrittääkseen valmistuksen laadunhallinnan tason, joka täyttää heidän suunnitteluotaksumansa. Toteutusluokka määritetään koko rakennuskohteelle, yksittäiselle kokoonpanolle tai kokoonpanon yksityiskohdalle. Joissain tapauksissa toteutusluokka rakenteelle, kokoonpanolle tai yksityiskohdalle on sama, kun taas joissain tapauksissa toteutusluokka kokoonpanolle tai yksityiskohdalle voi erota koko rakenteen toteutusluokasta.

Toteutusluokka valitaan seuraavien tekijöiden avulla:

- vaadittava luotettavuus (perustuen standardissa EN 1090 esitettyihin joko vaadittavaan seuraamusluokkaan tai luotettavuusluokkaan tai molempiin),
- Rakenteen, kokoonpanon tai yksityiskohdan tyyppi
- rakenteeseen, kokoonpanoon tai yksityiskohtaan kohdistuvan kuormituksen tyyppi (staattinen, kvasi-staattinen, väsyttävä tai seisminen).

Vaikka jokaisen rakennuksen toteutusluokka arvioidaan erikseen, niin yleensä toteutusluokka EXC2 on riittävä suurimmalle osalle rakennuksista, jotka eivät sijaitse maanjäristysalueilla. Toteutusluokkaa EXC4 käytetään rakennuksille, joiden vaurioituminen johtaa äärimmäisiin seuraamuksiin. Standardin EN 1993-1-1 kansallinen liite sisältää ohjeita toteutusluokan valintaan.

Rakenteen luokittelua turhan korkeaan toteutusluokkaan tulee välttää aina kun mahdollista, jotta vältetään tarpeettomat kustannukset. Esimerkiksi, toteutusluokka EXC2 voi olla projektille määritelty toteutusluokka, mutta täydellinen jäljitettävyys (EXC3) edellytetään osittaisen jäljitettävyyden (EXC2) sijasta. Tässä tapauksessa, mieluummin kuin valitaan toteutusluokka EXC3 yhden vaatimuksen perusteella, on

suositeltavaa valita koko kohteen toteutusluokaksi EXC2 mutta korkeampi toteutusluokka jäljitettävyyden osalta lisätään toteutuseritelmään.

11.4 Varastointi ja käsittely

Ruostumattomien terästen varastoinnissa ja käsittelyssä vaaditaan yleensä suurempaa huolellisuutta verrattuna hiiliteräksiin pinnan vaurioitumisen estämiseksi (erityisesti kiiltohehkutetut tai hiotut pinnat). Kontaminaatiota hiiliteräksestä ja raudasta tulee välttää, koska se aiheuttaa riskin pinnan korroosiolle. Varastointi- ja käsittelymenetelmistä tulee sopia etukäteen kyseeseen tulevien sopimusosapuolten kanssa, koskien myös riittävästi yksityiskohtia koskevia vaatimuksia. Nämä menettelyt koskevat esimerkiksi seuraavia vaatimuksia:

- Teräs tarkistetaan välittömästi toimituksen jälkeen pintavikojen osalta.
- Teräs voidaan suojata muovilla tai muulla pinnoitteella. Tämä tulee jättää paikoilleen niin pitkäksi aikaa kuin mahdollista ja pinnoite poistetaan vasta juuri ennen lopullista valmistusta. Suojaava pinnoite esitetään hankinta-asiakirjoissa, jos sitä vaaditaan (esim. kiiltohehkutetut pinnat).
- Jos käytetään muovista irrotettavaa liimapintaista kalvoa löyhästi kääritytyn muovikalvon sijasta, sen on oltava UV-luokiteltua, jotta estetään kalvon ominaisuuksien ennenaikainen heikentyminen ja jäljelle jääneen liima-aineen tarttuminen teräksen pintaan. Lisäksi kalvon kuntoa tulee tarkkailla ja poistaa se valmistajan suositteleman käyttöajan kuluessa, joka yleensä on 6 kuukautta.
- Varastointia suolapitoisessa kosteassa ilmastossa tulee välttää. Jos tätä ei voida välttää, pakkauksen tulisi estää suolojen tunkeutuminen pakkauksen sisään. Irrotettavia kalvoja ei koskaan pitäisi jättää teräksen pintaan, jos suola-altistus on odotettavissa, koska nämä kalvot ovat suoloja ja kosteutta läpäiseviä ja voivat muodostaa ihanteellisen olosuhteen rakokorroosiolle.
- Varastohyllyissä ei saa olla hiiliteräksestä valmistettuja hankaavia pintoja ja pinnat suojataan sen takia puulla, kumilla, muovipinnoilla tai kalvoilla. Levyt varastoidaan ensisijaisesti pystysuunnassa, koska vaakasuuntaisesti varastoitujen levyjen päällä voidaan kävellä, jolloin on riskinä mm. rautapartikkelien kerääntyminen pinnalle ja pinnan vaurioituminen.
- Hiiliteräksestä valmistettuja nostovälineitä, esim. ketjut, koukut ja listat, tulee välttää. Eristävien materiaalien tai imukuppien käyttö estää raudan kerääntymisen. Trukkinostimen haarukat tulee myös suojata vastaavasti.
- Kosketusta kemikaalien kanssa sekä liiallisia öljyä- ja rasvamääriä (jotka voivat tahria joitakin pintoja) tulee välttää.
- Ensisijassa käytetään erillisiä valmistustiloja hiiliteräksille ja ruostumattomille teräksille. Käytetään vain ruostumattomille teräksille tarkoitettuja työkaluja erityisesti hiomalaikkoja ja metalliharjoja. Käytettävät metalliharjat ja teräsvillat valmistetaan ruostumattomasta teräksestä, jonka korroosionkestävyys vastaa perusaineen korroosionkestävyyttä (esim. ferriittisestä ruostumattomasta tai matalaseosteisesta austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä valmistettuja harjoja ei saa käyttää paremmin korroosiota kestävän ruostumattoman teräksen harjaukseen).
- Valmistuksen ja asennuksen aikaisena varotoimenpiteenä kaikki terävät purseet (jäysteet) tulee poistaa.
- Erikoistoimenpiteet voivat olla tarpeen valmiiden rakenteiden kuljetuksen aikaiseksi suojaamiseksi.

Ohjeita pinnalle tarttuneen epäpuhtauden poistamiseksi esitetään standardissa ASTM A380.

11.5 Muotojen valmistaminen

Austeniittinen ruostumaton teräs muokkauslujittuu merkittävästi kylmämuovauksen aikana. Tämä on hyödyllinen ominaisuus mahdollistaen suuren muokkauksen venytysmuovauksen aikana ilman riskiä murtumaan. Haittapuolena esimerkiksi koneistettaessa edellytetään erityistä huolellisuutta syöttöön ja leikkausnopeuteen. Muokkauslujittuminen vaihtelee eri ruostumattomilla teräslajeilla, esimerkiksi teräslaji 1.4318 muokkauslujittuu voimakkaammin kuin muut laadut, joita käytetään rakennesovelluksissa. Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat helpommin rullamuovattavissa ja niiden pinta saadaan tasaisemmaksi kuin austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä.

11.5.1 Leikkaaminen

Ruostumaton teräs on suhteellisen kallis materiaali verrattuna joihinkin muihin metalleihin, jonka takia on syytä olla huolellinen levyosien piirrottaminen hukkapalojen välttämiseksi leikkauksen yhteydessä. Tulee ottaa huomioon, että hukkapaloja saattaa syntyä enemmän, jos materiaalin kiillotetun pinnan tai yhteen suuntaan kuvioidun pinnan tulee säilyä myös valmistuksen jälkeen. Eräät merkintäkynät tai -liidut ovat vaikeasti poistettavia tai aiheuttavat likaantumista, jos niitä käytetään suoraan teräksen pinnalla (mieluummin käytetään suojaavaa kalvoa). Merkintäaineiden sopivuus tulee tarkistaa samoin kuin liuottimet, joilla merkinnät poistetaan.

Ruostumatonta terästä voidaan leikata tavallisilla menetelmillä, kuten leikkurilla ja sahaamalla, mutta vaadittavat voimat ovat suurempia verrattuna saman paksuisiin hiiliteräksiin muokkauslujittumisesta johtuen. Jos mahdollista, leikkaus ja työstäminen suoritetaan, kun teräs on hehkutetussa tilassa. Tällöin muokkauslujittumisen vaikutus ja työkalujen kuluminen ovat pienempiä.

Plasmaleikkausmenetelmät ovat erityisen hyödyllisiä paksujen levyjen ja profiilien leikkaamiseen aineenpaksuuteen 125 mm asti ja kun niiden leikatut reunat koneistetaan, esim. hitsausta varten. Suurpaine-vesileikkaus soveltuu materiaalin leikkaamiseen aineenpaksuuteen 200 mm asti. Tällä menetelmällä leikkaus tapahtuu ilman materiaalin kuumentamista ja vetelyjä sekä muuttamatta mikrorakennetta ja ominaisuuksia. Laserleikkaus on soveltuva ruostumattomille teräksille, erityisesti kun edellytetään tiukkoja toleransseja tai kun leikataan epälineaarisia muotoja tai kuvioita: menetelmällä saavutetaan hyvälaatuinen leikkauspinta ilman riskiä vetelyille. Leikattaessa suoria linjoja käytetään yleensä giljotiinileikkuria. Käyttämällä avopäätyisiä leikkureita voidaan leikata leikkaavan terän pituutta pidempiä kappaleita vaikkakin sillä riskillä, että leikattuihin reunoihin syntyy pieniä portaita. Happiasetyleenileikkaus ei sovellu ruostumattoman teräksen leikkaamiseen, ellei käytetä leikkausjauhetta.

11.5.2 Kylmämuovaus

Ruostumatonta terästä voidaan muotoilla yleisesti käytetyillä kylmämuovaustekniikoilla kuten taivutus, painosorvaus, särmäys, hydraulinen muovaus ja syväveto. Rakenteellisissa sovellutuksissa särmäys on eniten käytetty tekniikka. Suurille määrille ohutlevytuotteita rullamuovaus voi kuitenkin olla taloudellisempi tapa.

Ruostumattoman teräksen taivuttamisessa tarvittavat voimat ovat suurempia kuin geometrisesti samanlaisten hiiliteräksestä valmistettavien rakenneosien valmistamisessa tarvittavat voimat muokkauslujittumisesta johtuen (n. 50 % austeniittisen teräksen kyseessä ollessa tai jopa enemmän duplex-teräksillä). Ruostumatonta

terästä tulee taivuttaa yli myös hieman enemmän hiiliteräkseen verrattuna takaisinjouston huomioon ottamiseksi. Ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä ei tapahdu merkittävästi muokkauslujittumista kylmämuovauksen yhteydessä. Suunniteltaessa monimutkaisia poikkileikkauksia, suunnittelijan tulisi olla yhteydessä valmistajaan mahdollisimman aikaisessa suunnittelun vaiheessa.

Ruostumattomien terästen suuri sitkeys sallii niinkin pienien säteiden käytön taivutuksessa kuin puolet ainepaksuudesta hehkutetuilla aineilla. Kuitenkin yleisesti suositellaan seuraavia minimiarvoja sisäpuolisille pyöristyssäteille:

t austeniittisille teräksille;
2t duplex-teräksille

missä *t* on aineenpaksuus.

Kylmämuovaus voi johtaa materiaalin sitkeyden heikkenemiseen ruostumattomilla teräksillä, kuten voi tapahtua hiiliteräksilläkin. Mikäli sitkeys on kriittinen vaatimus, suunnittelijan tulee ottaa huomioon kylmämuovauksen vaikutus materiaalin sitkeyteen, esimerkiksi tekemällä testejä mallikappaleella. Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä kylmämuovauksen aiheuttama sitkeyden heikkeneminen ei ole merkittävän suuruista.

Seuraavat ehdot tulee yleensä toteutua muovattaessa poikkileikkaukseltaan pyöreitä rakenneputkia:

- rakenneputken ulkohalkaisijan suhde seinämänpaksuuteen d/t ei ylitä arvoa 15 (jolloin vältetään suuret työkalukustannukset),
- taivutussäde (rakenneputken keskilinjalle) on suurempi kuin $1{,}5d$ tai $d + 100$ mm, kumpi on suurempi,
- rakenneputken pituussuuntainen hitsi asemoidaan taivutukseen nähden neutraaliakselille, joka pienentää taivutuksesta hitsiin aiheutuvia jännityksiä.

Taivutukseen perehtyneeltä yritykseltä on syytä pyytää neuvoja, kun taivutusta on tarkoitus suorittaa suuremmalla d/t suhteella tai pienemmällä taivutussäteellä. Vaihtoehtoisesti tarvittavia esituotannollisia kokeita voidaan tehdä varmistamaan, että taivutus ei aiheuta mekaanisia vaurioita tai dimensioiden muutokset ovat hyväksyttäviä. Rakenneputkille, joiden $d < 100$ mm, käyttökelpoinen taivutussäteen arvo voi olla esimerkiksi suurempi kuin $2{,}5d$. On huomioitava, että suunnittelija ottaa kaarevuussäteen vaikutuksen nurjahduskestävyyteen tarvittaessa huomioon.

11.5.3 Reiät

Reiät voidaan valmistaa poraamalla tai lävistämällä. Porausta käytettäessä tulee käyttää teräväkärkistä poraa soveltuvassa kulmassa ja soveltuvaa leikkausnopeutta. Pyöreäpäisen pistepuikon käyttöä ei suositella, koska se lujittaa teräksen pintaa. Voidaan käyttää keskitysreikää tai jos pistepuikkoa on käytettävä, sen kärjen tulee olla kolmion muotoinen. Lävistämistä voidaan käyttää austeniittisilla teräksillä noin 20 mm:n ainepaksuuteen asti; lujemmilla duplex-teräksillä suurin mahdollinen ainepaksuus on pienempi. Pienin lävistettävissä olevan reiän halkaisija on 2 mm suurempi kuin levyn paksuus.

11.6 Hitsaus

11.6.1 Yleistä

Ruostumattomien terästen hitsaamista käsittelee standardi EN 1011-3 *Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Ruostumattomien terästen kaarihitsaus.* Tässä luvussa esitetään lyhyt johdanto ruostumattomien terästen hitsaamiseen.

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat yleisesti hyvin hitsattavia tavanomaisin hitsausprosessein edellyttäen, että soveltuvia hitsausaineita käytetään. Duplex terästen hitsauksessa edellytetään tarkempaa minimi ja maksimi lämmöntuonnin hallintaa, ja duplex teräksille voidaan edellyttää hitsin lämpökäsittelyä tai erityisiä hitsausaineita.

Yleinen puhtaus ja saasteettomuus ovat tärkeitä hyvän hitsauksen laadun saavuttamiseksi. Öljyt ja muut hiilivedyt ja vahaliidulla tehdyt merkinnät poistetaan niiden hajoamisen ja hiilen syntymisen välttämiseksi. Hitsissä ei saa olla sinkkiä mukaan lukien sinkityistä tuotteista syntyvä sinkki eikä kuparia ja sen seoksia. (Kuparista juuritukea käytettäessä, juuritukeen tehdään ura välittömästi sulamisalueen viereen).

Ruostumattoman teräksen osalta on tärkeämpää kuin hiiliteräksen osalta vähentää kohtia, joissa rakokorroosio (ks. kohta 3.2.2) voi alkaa. Hitsausvirheet kuten reunahaava, vajaa tunkeuma, roiske, kuona ja sytytysjäljet ovat kaikki mahdollisia korroosion paikkoja ja ne tulee siten minimoida. Sytytysjäljet ja sytyttäminen irtonaisella maadoituksella vahingoittavat myös passiivikerrosta ja aiheuttavat mahdollisesti ennenaikaista korroosiota ja siten vahingoittavat valmiin rakenteen ulkonäköä.

Kun hitsin ulkonäkö on tärkeä, suunnittelijan tulee määrittää vaatimukset hitsin muodolle ja pinnalle. Tämä voi vaikuttaa valittavaan hitsausprosessiin tai hitsauksen jälkikäsittelyyn. Tulee kiinnittää huomiota myös hitsin sijaintiin ja siihen onko mahdollista soveltaa hitsin jälkikäsittelyä.

Suunnittelijan tulee olla tietoinen, että hitsauksen aiheuttamat vetelyt yleensä ovat suuremmat kuin hiiliteräksillä (ks. kohta 11.6.4). Lämmöntuonnin ja palkojen välisen lämpötilan kontrollointi edesauttavat minimoimaan vetelyitä ja välttämään mahdollisia metallurgisia muutoksia (ks. kohta 11.6.5).

Hitsaus suoritetaan hyväksytyillä hitsausmenetelmillä käyttäen standardien of EN ISO 15609, EN ISO 14555 tai EN ISO 15620 mukaisia hitsausohjeita (WPS). Hitsaajat hyväksytään standardin EN ISO 9606-1 ja hitsausoperaattorit standardin EN ISO 14732 mukaisesti. Standardissa EN 1090-2 esitetään teknisen osaamisen tasot, joita edellytetään hitsauksen koordinointihenkilöiltä. Edellytettävä vaatimustaso riippuu toteutusluokasta, ruostumattoman teräksen tyypistä ja hitsattavan materiaalin aineenpaksuudesta.

Hitsaussuunnitelman tulee sisältää seuraavat asiat:

- hitsausmenetelmän oikeellisuuden toteaminen yksilöimällä hitsausmenetelmä ja testausvaatimukset;
- hitsaajien pätevyydet;
- hitsaustoimenpiteiden tarkistus valmistuksen ja hitsauksen aikana sekä hitsauksen jälkeen;
- tarkastuslaajuus ja käytettävät rikkomattomat aineenkoetusmenetelmät;
- sallittavien hitsausvirheiden hyväksymiskriteerit.

Mutterin lukitsemista hitsaamalla ruuviin ei saa koskaan sallia, koska ruuveja ja muttereita ei ole tarkoitettu hitsattavaksi. Valmistamalla ”häiriö” ruuvin kierteeseen (esimerkiksi valmistamalla kierteet paksummiksi ruuvin päissä) saattaa olla yksi hyväksyttävä menettely, kun mutterin tulee olla lukittavissa.

11.6.2 Hitsausmenetelmät

Kuten edellä todettiin, yleisiä sulahitsausmenetelmiä voidaan käyttää ruostumattoman teräksen hitsaukseen. Taulukossa 11.1 esitetään erilaisten hitsausprosessien soveltuvuus paksuus-alueittain ja muut ehdot.

Taulukko 11.1 *Hitsausprosessit ja niiden soveltuvuus*

Hitsausprosessi (EN ISO 4063)	**Soveltuvat tuote-muodot**	**Liitos-muodot**	**Ainepak-suusalue**	**Hitsaus-asennot**	**Soveltu-vuus konepaja- tai asennus-olosuh-teisiin**
111 Puikkohitsaus MMAW)	Kaikki paitsi ohutlevyt	Kaikki	3 mm [1] tai suurempi	Kaikki	Kaikki
121/122 Jauhekaarihitsaus (SAW)	Kaikki paitsi ohutlevyt	Kaikki	6 mm [1] tai suurempi	Jalkoasento	Kaikki
131 MIG-hitsaus (MIG)	Kaikki	Kaikki	2 mm [1] tai suurempi	Kaikki	Kaikki [2]
136 MAG-täytelankahitsaus (FCAW)	Kaikki	Kaikki	2 mm [1t] tai suurempi	Kaikki	Kaikki
141 TIG-hitsaus (TIG)	Kaikki	Kaikki	Enintään 10 mm asti	Kaikki	Kaikki [2]
2 Vastushitsaus	Vain ohutlevyt	Kaikki	n. 3 mm: iin asti	Kaikki	Kaikki
521/522 Laserhitsaus (LBW)	Kaikki	Kaikki	Profiilista muodosta riippuen mahdollisesti 25 mm asti	Kaikki	Vain konepajas-sa

Huom.:
[1] Riippuu käytettävän hitsausliitoksen tyypistä.
[2] Herkempi säälle kuin muut hitsausprosessit ja vaaditaan parempaa suojausta ympäristön suhteen.

Austeniittisille ja duplex ruostumattomille teräksille ei normaalisti suoriteta esilämmitystä, lukuun ottamatta kondensoituneen veden haihduttamiseksi teräksen pinnalta.

Ferriittiset ruostumattomat teräslajit ovat herkkiä rakeenkasvulle korkeammissa lämpötiloissa kuin 950°C, jonka seurauksena sitkeys heikkenee. Tämän ehkäisemiseksi hitsauksen lämmöntuonti pitäisi olla alhainen pitämällä hitsisula pienenä ja käyttämällä suurempaa hitsausnopeutta. Hyvällä lämmöntuonnin hallinnalla, saavutetaan ohuille materiaaleille, 2-3 mm: iin asti, sitkeitä hitsejä, joissa sitkeys on muutenkin parempi puuttuvan paksuusefektin vuoksi.

11.6.3 Hitsauslisäaineet

Laajasti saatavilla olevat hitsauslisäaineet on suunniteltu siten, että niillä saadaan aikaiseksi hitsi, jonka lujuus ja korroosionkestävyys vastaavat perusainetta ja minimoivat jähmettymisestä aiheutuvaa halkeilua. Erikoissovellutuksissa, kuten epätavallisen aggressiiviset ympäristöt tai kun vaaditaan ei- magneettisuutta, käytetään teräksen tuottajien ja hitsausaineiden valmistajien ohjeita. Kaikkien hitsausaineiden tulee täyttää standardissa EN 1090-2 esitetyt vaatimukset. Olennaista on, että hitsausaineisiin ei tartu vieraita aineita ja hitsausaineita säilytetään valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kaikki hitsausprosessit, joissa käytetään hitsausjauhetta (esim. MMAW, FCAW, SAW) ovat herkkiä kosteasta ilmasta siirtyvälle kosteudelle, joka voi johtaa huokosten muodostumiseen hitsissä. Joillain hitsausprosesseilla, kuten esimerkiksi TIG- ja larserhitsaus, hitsaus saattaa olla mahdollista suorittaa ilmanlisäainetta.

Austeniittisen lisäaineen käyttö hitsattaessa ferriittisiä ruostumattomia teräksiä tuottaa erityisen sitkeitä hitsejä verrattuna hitsattaessa ferriittisillä lisäaineilla. Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä on mahdollista hitsata ilman lisäainettakin, mikä kuitenkin johtaa korroosionkestävyyden, sitkeyden ja iskusitkeyden heikkenemiseen ja siksi hitsaaminen ilman lisäainetta tulisi suorittaa huolellisuutta noudattaen.

11.6.4 Hitsausmuodonmuutokset

Muiden metallien tavoin ruostumattomaan teräkseen syntyy yleensä muodonmuutoksia (vetelyä) hitsauksessa. Muodonmuutokset (kulmikkuus, kaareutuminen, kutistuminen, jne.) ovat luonteeltaan samanlaisia kuin hiiliteräksillä. Ruostumattomien terästen, erityisesti austeniittisten teräslajien osalta, muodonmuutokset ovat kuitenkin suurempia verrattuna hiiliteräksiin johtuen suuremmista lämpölaajenemiskertoimista ja alhaisemmista lämmönjohtavuuksista (joka aiheuttaa jyrkempiä lämpötilagradientteja, ks. 2.4).

Ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä hitsausmuodonmuutokset ovat pienempiä verrattuna austeniittisiin teräslajeihin. Hitsausmuodonmuutokset duplex ruostumattomilla teräksillä ovat suuruudeltaan ferriittisten ja austeniittisten teräslajien välissä.

Hitsausmuodonmuutoksia voidaan hallita, mutta ei eliminoida. Suunnittelija ja valmistaja voi ryhtyä seuraaviin toimenpiteisiin:

Suunnittelijan toimenpiteet

- Harkitaan hitsin tarpeellisuus.
- Pienennetään hitsauksen laajuutta
- Pienennetään hitsin pinta-alaa. Esimerkiksi paksujen poikkileikkausten tapauksessa, X-railoja, U-railoja tai kaksois-U-railoja V-railojen sijasta.
- Käytetään symmetrisiä liitoksia.
- Suunnitellaan suurempien mittatoleranssien käyttö.

Valmistajan toimenpiteet

- Käytetään tehokkaita hitsausjigejä. Jos mahdollista, hitsausjigiin tulisi liittyä kupari tai alumiinisauvat, joilla helpotetaan lämmönsiirtymistä pois hitsattavasta kohdasta.
- Kun tehokkaan hitsausjigin käyttö ei ole mahdollista, käytetään lähekkäin sijaitsevia tasapainoisessa järjestyksessä tehtäviä siltahitsejä.
- Varmistetaan hyvä yhteensovitus ennen hitsausta.

- Käytetään mahdollisimman pientä lämmöntuontia ottaen huomioon valittu hitsausprosessi.
- Käytetään tasapainoista ja tarkoituksenmukaista hitsausjärjestystä kuten taka-askelhitsausta ja jaksottaista monipalkohitsausta.

11.6.5 Metallurgisia näkökohtia

Tässä ei käsitellä ruostumattomiin teräksiin liittyviä metallurgisia asioita lukuun ottamatta joitakin merkittävimpiä asioita.

Erkaumien muodostuminen austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä

Austeniittisilla teräksillä hitsin muutosvyöhyke ei ole altis rakeenkasvulle ja hauraiden metallisten faasien erkautumiselle. Hitsausprosessit suunnitellaan yleensä siten, että erkautumisvaikutuksille kriittisellä lämpötila-alueella (450 - 900 °C) oloaikaa kontrolloidaan. Toistuvat hitsien korjaukset tietenkin kasvattavat em. aikaa ja sen takia hitsien korjauskerrat rajoitetaan tavallisesti kolmeen

Kromikarbidien erkautuminen ja sen seurauksena olevaa korroosionkestävyyden pienenemistä käsitellään kohdassa 3.2.6 raerajakorroosion yhteydessä. Raerajakorroosio ei yleensä ole ongelma vähän hiiltä sisältävillä austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä (esim. 1.4307 ja 1.4404). Hitsauskorroosion vaikutus voi kuitenkin hitsatuissa rakenteissa, joiden materiaalit eivät ole matalahiilisiä lajeja.

Jähmettymissäröily austeniittisissa teräksissä

Hitsiaineen jähmettymissäröilyä, jota kutsutaan myös kuumahalkeiluksi, ei esiinny, jos hitsiaine sisältää 5 % tai enemmän ferriittiä. Teräksen valmistajat tasapainottavat yleisten austeniittisten terästen kemiallisen koostumuksen ja lämpökäsittelyn siten, että ne eivät käytännöllisesti katsoen sisällä ferriittiä toimitustilassa, mutta siten, että ferriittiä muodostuu riittävästi hitsiin, joka tehdään ilman lisäainetta (autogenous weld). Myös tässä tapauksessa säröilyriskin pienentämiseksi on aiheellista pitää lämmöntuonti (hitsiin tuotava lämpömäärä) ja välipalkojen lämpötila sekä rakenneosan jäykkyys pieninä. Paksumpien aineenpaksuuksien hitsauksessa käytetään lisäaineita, joiden kemiallinen koostumus on sellainen, että hitsiaineeseen muodostuu sopiva määrä ferriittiä. Yleensä ei ole tarpeellista mitata muodostuneen ferriitin tarkkaa määrää, koska asianmukaisten hitsausmenetelmien ja hitsauslisäaineiden käyttö varmistaa, että jähmettymissäröilyä ei esiinny.

Duplex-terästen hauraus

Duplex-teräkset ovat herkkiä “475°C-hauraudelle” ja “sigma- hauraudelle”. ”475°C haurautta” esiintyy, kun terästä pidetään likipitäen lämpötila-alueella 550 °C … 400 °C tai teräksen annetaan jäähtyä hitaasti em. lämpötila-alueen yli. Ilmiö kasvattaa vetomurtolujuutta ja kovuutta sekä pienentää sitkeyttä vedossa ja iskunkestävyyttä. “Sigma-hauraus” voi esiintyä, jos terästä pidetään pitkän aikaa lämpötila-alueella 565 °C … 900 °C, mutta esiintymisaika voi olla niinkin lyhyt kuin puoli tuntia sopivissa olosuhteissa (riippuen teräksen kemiallisesta koostumuksesta ja termomekaanisesta tilasta). “Sigma- hauraden” vaikutukset ovat suurimmillaan huoneen lämpötilassa. Molemmat haurausilmiöt heikentävät korroosionkestävyyttä ja sitkeyttä.

Sekä “475 °C-hauraus” että “sigma-hauraus” voidaan hallita riittävästi käyttämällä oikeita hitsausprosesseja. Suurimmaksi välipalon lämpötilaksi usein suositellaan 200 °C. Erityisen huolellinen tulee olla hitsattaessa isoja profiileja.

Haurastumisen välttämiseksi terästen pitkäaikaista pitämistä yli 300 °C lämpötilassa tulee välttää.

11.6.6 Hitsien jälkikäsittely

Ruostumattomaan teräkseen valmistettujen hitsien lämpökäsittelyä tehdään harvoin muualla kuin valmistavan konepajan tiloissa. Joissain tapauksissa voidaan edellyttää jännityksen poistohehkutus. Kaikki lämpökäsittelyt voivat olla riskitekijä ja siitä syystä asiantuntijaa pitäisi käyttää työn toteuttamisessa.

Hitsien jälkikäsittely on yleensä tarpeellinen, kuten seuraavissa kohdissa esitetään, erityisesti kaarihitsausta käytettäessä. On tärkeää määrittää hyvissä ajoin vaadittava hitsin jälkikäsittely kustannusylitysten ja mahdollisesti huonon käytettävyyden välttämiseksi. Pinnan jälkikäsittelytekniikoita käsitellään kohdassa 11.8.

Hitsin viimeistelyyn tavallisimmin käytettävät menetelmät ovat terästharjaus ja hiominen. Valmistajan tulisi minimoida hitsin viimeistelyn määrä. Kevyt hiominen hienolla laikalla on paras tapa; liian suurella paineella hiominen saa aikaan teräksen kuumenemisen, joka voi heikentää korroosionkestävyyttä. Käytettävien terästharjojen tulee olla tehty ruostumattomasta teräksestä ja niitä tulee käyttää vain näille ruostumattomille teräksille (ks. kohta 11.4). Voimakas hitsin harjaaminen voi johtaa vieraiden aineiden kiinnitarttumiseen teräksen pintaan, joka voi aiheuttaa korroosiota.

Hyvä käytäntö on poistaa kaikki lämmöstä aiheutuva värjääntyminen eli ns. päästövärit. Keltainen päästöväri voi osoittautua tyydyttäväksi, kun ruostumaton teräs antaa hyvän korroosionkestävyysmarginaalin tarkasteltavassa ympäristössä. Jos näin ei kuitenkaan ole tai kun päästöväri ei ole esteettisistä syistä hyväksyttävissä, väri voidaan poistaa peittaamalla tai puhaltamalla lasihelmillä. Peittaus voidaan suorittaa upotuspeittauksena (ks. kohta 10.6) tai käyttämällä tahnoja valmistajien ohjeiden mukaan. Esimerkiksi putkistohitsien juuren puoli voidaan suojata kaasulla päästövärien synnyn estämiseksi.

Hitsin pinnan vasarointi on edullinen hitsin jälkikäsittely. Se aiheuttaa puristusjännityksiä pintaan, joka parantaa väsymiskestävyyttä ja kestävyyttä jännityskorroosiosta aiheutuvaa säröilyä vastaan sekä parantaa esteettistä ulkonäköä. Vasarointia ei kuitenkaan saa käyttää väsymiskestävyyden parantamisen perusteena.

Metallin poistaminen merkittävästi työstämällä aiheuttaa jännitysten vapautumista ja sen takia muodonmuutoksia hitsattuun tuotteeseen. Tapauksissa, joissa muodonmuutokset ovat sellaisia, että mittatoleransseja ei voida saavuttaa, voidaan edellyttää lämpökäsittelyä jännitysten poistamiseksi.

11.6.7 Hitsien tarkastus

Taulukossa 11.2 esitetään ruostumattomille teräksille ja hiiliteräksille tavallisesti käytettävät hitsien tarkastusmenetelmät.

Esitettyjä menetelmiä käytetään rakenteellisen eheyden ja korroosionestoon liittyvän tarpeen mukaan. Silmämääräinen tarkastus tulee kuitenkin tehdä aina hitsauksen kaikissa vaiheissa, koska siten voidaan estää monien ongelmien syntyminen valmistuksen aikana. Ruostumattoman teräksen pinnan tarkastaminen on tärkeämpi toimenpide kuin hiiliteräksellä, koska ruostumatonta terästä käytetään etupäässä korroosion estämisen takia ja jo pieni pintasärö voi aiheuttaa sen, että materiaali on altis korroosiolle.

Taulukko 11.2 *Hitsien tarkastusmenetelmät*

NDT:n tyyppi	Austeniittinen ruostumaton teräs	Ruostumaton duplex-teräs	Ferriittinen ruostumaton teräs	Hiiliteräs
Pintatar-kastus	Silmämääräinen Tunkeumaneste	Silmämääräinen Tunkeumaneste Magneettijauhe	Silmämääräinen Tunkeumaneste Magneettijauhe	Silmämääräinen Tunkeumaneste Magneettijauhe
Volumet-rinen	Radiografia (X-ray, Gamma)	Radiografia (X-ray, Gamma)	Radiografia (X-ray, Gamma)	Radiografia (X-ray, Gamma) Ultraääni

Magneettijauhetarkastus ei tule austeniittisilla teräksillä kyseeseen, koska ko. teräkset eivät ole magneettisia. Ultraäänimenetelmien käyttö on rajoitettua hitsien tarkastuksessa johtuen tulkintavaikeuksista; niitä voidaan kuitenkin käyttää perusaineen tarkastukseen. Gammakuvaus ei sovellu säröjen tai liitosvirheen tarkastamiseen, jos ainepaksuus on alle 10 mm.

11.7 Kitkasyöpyminen ja kiinnileikkautuminen

Kun pinnat ovat kuormituksen alaisia ja liukuvat toistensa suhteen, ruostumattomilla teräksillä voi tapahtua kiinnittimen kitkasyöpymistä tai kylmähitsautumista johtuen pintojen paikallisesta kiinnitarttumisesta ja pinnan repeämästä. Tätä voi tapahtua myös alumiinilla, titaanilla ja muilla seoksilla, joilla on itsestään muodostuva korroosiolta suojaava oksidikalvo. Joissain tapauksissa voi tapahtua yhteenhitsaantumista ja kiinnileikkautumista. Sovelluksissa, joita ei pureta tai joissa kiinnityksen löystyminen ei ole suotavaa, tämä voi olla etu.

Sovelluksissa, joissa kiinnittimen poistaminen korjausten yhteydessä on tärkeää, kitkasyöpymistä pitäisi välttää. Useita varotoimia voidaan käyttää tämän ongelman välttämiseksi:

- Vähennä laitteiston kierrosnopeutta RPM
- Varmista, että kierteet ovat mahdollisimman kitkattomat
- Voitele sisäpuoliset ja ulkopuoliset kierteet voiteluaineilla, jotka sisältävät molybdeenidisulfidia, micaa, grafiittia tai talkkia, tai erityisesti kitkasyöpymisen estämiseksi soveltuvalla vahalla (mutta kitkasyöpymistä estävän aineen arvioinnissa kyseessä olevaan kohteeseen tulee olla huolellinen)
- Käytetään erilaisia ruostumattomia teräslajeja (teräslajeja, jotka eroavat toisistaan koostumuksen, muokkausasteen ja kovuuden osalta). Esimerkiksi EN ISO 3506:n mukaisia ruuvi-mutteriyhdistelmiä A2-C2, A4-C4 tai A2-A4
- Vaikeissa tapauksissa käytetään sovellutuskohtaisesti voimakkaasti muokkauslujitettuja ruostumattomia teräksiä toisena materiaalina tai molempina kosketukseen joutuvina materiaaleina (esim. S21800, tunnetaan myös nimellä Nitronic 60) tai käytetään kovia pinnoitteita.

On suositeltavaa, että ruuvimateriaalit olisivat kylmämuokatussa tilassa vähintään ominaisuusluokassa 70 (ks. taulukko 2.4). Pehmeässä tilassa olevia ruuvimateriaaleja ei tulisi käyttää, koska ne ovat alttiita kitkasyöpymiselle. Käytettäessä ruuveja, joissa on valssatut kierteet koneistettujen sijasta sekä tämän lisäksi välttämällä hienokierteitä ja tiiviitä kierteen muotoja, pienennetään kiinnileikkautumisen todennäköisyyttä.

11.8 Pinnan viimeistely

Ruostumattoman teräksen pinnan viimeistely on tärkeä suunnittelukriteeri ja se tulee määrittää selvästi arkkitehtonisten tai toiminnallisten vaatimusten mukaan. Mitä hienompi pinta on, sen suuremmat ovat kustannukset. Toimenpiteet ennen käsittelyä ja hitsausta tulee ottaa huomioon. Esisuunnittelu on tärkeä kustannusten säästämiseksi. Esimerkiksi, jos kaiteiden putkien väliset hitsit kätketään näkymättömiin, se pienentää viimeistelykustannuksia ja parantaa huomattavasti kaiteen lopullista ulkonäköä. Kun rakenneosan pinnanviimeistelyksi esitetään kiillotus, hionta tai muu kuin tehdaspinta tai puhaltaminen abrasiiveilla, on pinnanviimeistely yleensä kustannustehokkaampaa tehdä käytettäville tuotteille (levyt, profiilit) jo ennen kuin niistä valmistetaan rakenneosa. Esimerkiksi L- ja U-profiilit, rakenneputket ja levyt voidaan kiillottaa, ennen kuin ne hitsataan tai muulla tavoin kiinnitetään kokoonpanoon.

Teräksen pinta tulee saattaa sen korroosionkestävyyttä vastaavaan tilaan poistamalla kaikki hehkutushilse ja epäpuhtaudet. Peittaus happokylvyssä irrottaa hehkutushilseen ja pinta voidaan harjata puhtaaksi, joka voi muuttaa pinnan ulkonäköä mattamaisemmaksi tai himmeämmäksi. Peittaaminen liuottaa myös kiinnittyneet rauta- tai hiiliteräspartikkelit, jotka, jos niitä ei poisteta, voivat myöhemmin paljastua ruostepisteinä ruostumattoman teräksen pinnalla.

Hankaavat käsittelyt, kuten hionta ja kiillottaminen aiheuttavat yhdensuuntaisesti kuvioidun pinnan ja siten hitsien näkymättömäksi saaminen voi olla vaikea levyissä ja arkeissa, joiden pinta vastaa tavallista valssausta. Kokeiden tekeminen voi olla tarpeellista yksityiskohtaisen menetelmän määrittämiseksi, jotta haluttu pinnan laatu saavutetaan. Laser hitsaus on usein soveltuva menetelmä esteettisille hitseille rakenteellisissakin kokoonpanoissa, kun koetetaan häivyttää hitsi vaikeammin silmin havaittavaksi.

Elektrolyyttisellä kiillotuksella valmistetaan kirkas kiiltävä pinta, joka vastaa erittäin kiiltäväksi hangattua pintaa. Menetelmällä poistetaan ohut pintakerros ja siinä olevia hapettumia. Vaikeammin poistettavien hapettumien poistaminen edellyttää peittausta tai hiontaa, jotka varmistavat pinnan yhtenäisen ulkonäön elektrolyyttisen kiillotuksen jälkeen. Kun kokoonpanon koko sallii, elektrolyyttinen kiillotus tehdään kastamalla kokoonpano säiliössä, joka sisältää elektrolyytin ja sähköiset kytkennät. Käsikäyttöisiä laitteistoja voidaan käyttää poistamaan värjäymät hitsistä tai kiillottaa valitut alueet. On olemassa myös muita pinnan käsittelyjä kuten sähköinen pinnoittaminen, rumpukäsittely, syövytys, etsaaminen, värjääminen ja pinnan mustaaminen, mutta niitä käytetään harvoin rakenneteknisissä sovellutuksissa ja niitä ei tässä käsitellä.

Pinnoilla ei saa olla epäpuhtauksia valmiissa rakenteessa. Erityistä huomiota tulee kiinnittää epäpuhtauksiin, jotka syntyvät lähellä tehtävistä hiiliteräksiin liittyvistä töistä erityisesti hiontapölystä. Ruostumaton teräs tulee joko suojata irrotettavalla muovikalvolla tai sopimusasiakirjoissa lopullinen pinta tulee määrittää puhdistettavaksi rakenteen valmistumisen jälkeen.

.

LIITE A Ruostumattomien terästen merkintöjen vastaavuus

Taulukossa A.1 esitetään materiaalien vastaavuus standardien EN 10088 ja US merkintöjen välillä.

Taulukko A.1 *Ruostumattomien terästen merkinnät – Vastaavuus eurooppalaisen ja US standardin välillä*

Teräslaji standardien EN 10088 mukaan		US	
No.	Nimike	ASTM	UNS
Austeniittinen			
1.4301	X5CrNi18-10	304	S30400
1.4306	X2CrNi19-11	304L	S30403
1.4307	X2CrNi18-9	304L	S30403
1.4311	X2CrNin18-10	304LN	S30453
1.4318	X2CrNiN18-7	301LN	S30153
1.4401	X5CrNi Mo17-12-2	316	S31600
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	S31603
1.4406	X2CrNiMoN17-11-2	316LN	S31653
1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	316LN	S31653
1.4432	X2CrNiMo17-12-3	316L	S31603
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	316L	-
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	317LMN	S31726
1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	-	N08926
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	904 L	N08904
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	S32100
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	-	S31254
1.4565	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	-	S34565
1.4567 *	X3CrNiCu18–9-4		S30430
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	S31635
1.4578 *	X3CrNiCuMo17–11–3-2	-	-
Duplex			
1.4062 *	X2CrNiN22-2--		S32202
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1		S32101
1.4362	X2CrNiN23-4	2304#	S32304
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	2507#	S32750
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2205#	S32205
1.4482 *	X2CrMnNiMoN21–5-3		-
1.4501 *	X2CrNiMoCuWN25–7-4		S32760
1.4507 *	X2CrNiMoCuWN25–7-4		S32520
1.4662 *	X2CrNiMnMoCuN24–4-3–2		S82441
Ferriittinen			
1.4003	X2CrNi12	-	S41003
1.4016	X6Cr17	430	S43000
1.4509	X2CrTiNb18	441+	S43940
1.4512	X2CrTi12	409	S40900
1.4521	X2CrMoTi18-2	444	S44400
1.4621 *	X2CrNbCu21	-	S44500
Kaikki muut materiaalit sisältyvät standardeihin EN 10088-4/5 paitsi ne, jotka on merkitty *, ja sisältyvät ainoastaan standardiin EN 10088-2/3. # yleisesti käytetty kauppanimi. + 441 on yleinen kauppanimi teräslajille, mutta ei sisälly ASTM luokitteluun.			

LIITE B Kylmämuovaamalla valmistettujen profiilien lujittuminen

Seuraavia kaavoja voidaan yleensä käyttää kaiken tyyppisille kylmämuovaamalla valmistetuille profiileille.

Kylmämuovaamalla valmistetun profiilin valmistuksen aikana tapahtunut muokkauslujittuminen voidaan hyödyntää poikkileikkauksen ja rakenneosan mitoituksessa korvaamalla f_{y} keskimääräisellä korotetulla myötölujuudella f_{ya}. Pilarin nurjahdustarkastelussa, korotettua myötölujuutta f_{ya} käytetään yhdessä taulukossa 6.1 esitettyjen nurjahduskäyrien kanssa. Menetelmä perustuu laajaan koeaineistoon ja se kattaa useita poikkileikkauksia.

Muokkauslujittumisen seurauksena kohonnut lujuus voidaan ottaa huomioon, kun mitoitetaan jatkuvan lujittumisen menetelmällä, joka on kuvattu liitteessä D.

a) Ruostumattomille teräsprofiileille, jotka valmistetaan särmäämällä, kohonnut keskimääräinen myötölujuus f_{ya} voidaan määrittää ottamalla huomioon kylmämuovauksen vaikutus 90°:en nurkissa:

$$f_{\mathrm{ya}} = \frac{f_{\mathrm{yc}}\, A_{\mathrm{c,pb}} + f_{\mathrm{y}}(A - A_{\mathrm{c,pb}})}{A} \tag{B.1}$$

b) Kylmämuovaamalla valmistetuille ruostumattomille rakenneputkille (RHS, SHS), kohonnut keskimääräinen myötölujuus f_{ya} voidaan määrittää ottamalla huomioon kylmämuovauksen vaikutus poikkileikkauksen suorilla sivuilla sekä laajennetulla nurkka-alueella:

$$f_{\mathrm{ya}} = \frac{f_{\mathrm{yc}}\, \mathrm{A}_{\mathrm{c,rolled}} + f_{\mathrm{yf}}(A - A_{\mathrm{c,rolled}})}{A} \tag{B.2}$$

c) Kylmämuovaamalla valmistetuille ruostumattomilla rakenneputkille (CHS), kohonnut keskimääräinen myötölujuus f_{ya} voidaan määrittää ottamalla huomioon kylmämuovauksen vaikutus poikkileikkaukseen:

$$f_{\mathrm{ya}} = f_{\mathrm{yCHS}} \tag{B.3}$$

missä:

- f_{y} perusmateriaalin myötölujuus (teräslevyn tai teräsnauhan, josta profiilit valmistetaan kylmämuovaamalla, esitetty taulukossa 2.2)
- f_{yc} on nurkka-alueen laskettu myötölujuus
- f_{yf} on poikkileikkauksen suoran sivun laskettu myötölujuus
- f_{yCHS} on poikkileikkaukseltaan pyöreän profiilin laskettu myötölujuus
- A on poikkileikkauksen pinta-ala
- $A_{\mathrm{c,pb}}$ on nurkka-alueiden kokonaispinta-ala särmäämällä valmistetuille profiileille

$A_{\mathrm{c,rolled}}$ on rakenneputken nurkkien kokonaispinta-ala ja sisältää jokaisen nurkan molemmin puolin alueen pituudeltaan 2t poikkileikkauksen kehällä.

(i) Suureiden f_{yc}, f_{yf} ja f_{yCHS} määrittäminen

$$f_{\mathrm{yc}} = 0{,}85K\left(\varepsilon_{\mathrm{c}} + \varepsilon_{\mathrm{p0,2}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \quad \text{ja} \quad f_{\mathrm{y}} \leq f_{\mathrm{yc}} \leq f_{\mathrm{u}} \tag{B.4}$$

$$f_{\mathrm{yf}} = 0{,}85K\left(\varepsilon_{\mathrm{f}} + \varepsilon_{\mathrm{p0,2}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \quad \text{ja} \quad f_{\mathrm{y}} \leq f_{\mathrm{yf}} \leq f_{\mathrm{u}} \tag{B.5}$$

$$f_{\mathrm{yCHS}} = 0{,}85K\left(\varepsilon_{\mathrm{CHS}} + \varepsilon_{\mathrm{p0,2}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \quad \text{ja} \quad f_{\mathrm{y}} \leq f_{\mathrm{yCHS}} \leq f_{\mathrm{u}} \tag{B.6}$$

missä

ε_{c} on nurkka-alueen muovauksen aiheuttama venymä

ε_{f} on rakenneputken suorien sivujen muovauksen aiheuttama venymä

$\varepsilon_{\mathrm{CHS}}$ on CHS poikkileikkaukseen muovauksen aiheuttama venymä

jotka määritetään seuraavasti:

$$\varepsilon_{\mathrm{c}} = \frac{t}{2(2r_i + t)} \tag{B.7}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{f}} = \left[\frac{t}{900}\right] + \left[\frac{\pi t}{2(b + h - 2t)}\right] \tag{B.8}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{CHS}} = \frac{t}{2(d - t)} \tag{B.9}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{p0,2}} = 0{,}002 + \frac{f_{\mathrm{y}}}{E} \tag{B.10}$$

$$K = \frac{f_{\mathrm{y}}}{\varepsilon_{\mathrm{p0,2}}^{n_{\mathrm{p}}}} \tag{B.11}$$

$$n_{\mathrm{p}} = \frac{ln(f_{\mathrm{y}}/f_{\mathrm{u}})}{ln(\varepsilon_{\mathrm{p0,2}}/\varepsilon_{\mathrm{u}})} \tag{B.12}$$

missä

f_{u} perusmateriaalin murtolujuus (teräslevyn tai teräsnauhan, josta profiilit valmistetaan kylmämuovaamalla, esitetty taulukossa 2.2)

ε_{u} on murtolujuutta f_{u}vastaava murtovenymä, jonka arvo määritetään yhtälöillä (C.6) ja (C.7)

r_i on nurkan sisäsäde, mikäli arvoa ei tunneta voidaan käyttää $2t$.

(ii) Nurkka-alueen poikkileikkauspinta-alojen $A_{\mathrm{c,pb}}$ ja $A_{\mathrm{c,rolled}}$ määrittäminen

$$A_{\mathrm{c,pb}} = \left(n_c\, \pi \frac{t}{4}\right)(2r_i + t) \tag{B.13}$$

$$A_{\mathrm{c,rolled}} = \left(n_c\, \pi \frac{t}{4}\right)(2r_i + t) \; + \; 4n_c t^2 \tag{B.14}$$

missä n_c on 90° nurkkien lukumäärä poikkileikkauksessa.

LIITE C Materiaalikäyttäytymisen mallintaminen

Myötölujittumisen huomioon ottava jännitys-venymä-kuvaaja voidaan laskea seuraavilla yhtälöillä:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0{,}002\left[\frac{\sigma}{f_\mathrm{y}}\right]^n \qquad \text{kun } \sigma \leq f_\mathrm{y} \qquad \text{(C.1)}$$

$$\varepsilon = 0{,}002 + \frac{f_\mathrm{y}}{E} + \frac{\sigma - f_\mathrm{y}}{E_\mathrm{y}} + \varepsilon_\mathrm{u}\left[\frac{\sigma - f_\mathrm{y}}{f_\mathrm{u} - f_\mathrm{y}}\right]^m \qquad \text{kun } f_\mathrm{y} < \sigma \leq f_\mathrm{u} \qquad \text{(C.2)}$$

missä:

σ on insinöörijännitys

ε on insinöörivenymä

E, f_y ja f_u esitetään kohdassa 2.3.1 tai standardissa EN 10088(osat).

n on tekijä, joka esitetään taulukossa 6.4 tai lasketaan mitatuista ominaisuuksista:

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln\left[\frac{f_\mathrm{y}}{R_\mathrm{p0,05}}\right]} \qquad \text{(C.3)}$$

missä

$R_\mathrm{p0,05}$ on 0,05 % pysyvää venymää vastaava jännitys.

Standardissa EN 1993-1-4 tällä hetkellä esitetään epätarkka yhtälö (C.4) tekijälle n, joka perustuu 0,01 % rajaan, $R_\mathrm{p0,01}$. On oletettavaa, että yhtälö (C.4) korvataan yhtälöllä (C.3) standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left[\frac{f_\mathrm{y}}{R_\mathrm{p0,01}}\right]} \qquad \text{(C.4)}$$

E_y on myötöjännitystä vastaava jännitys-venymä-kuvaajan tangenttimoduli:

$$E_\mathrm{y} = \frac{E}{1 + 0{,}002n\left[\frac{E}{f_\mathrm{y}}\right]} \qquad \text{(C.5)}$$

ε_u on murtolujuutta f_u vastaava murtovenymä, jonka arvo saadaan likimääräisesti:

$$\varepsilon_\mathrm{u} = 1 - \frac{f_\mathrm{y}}{f_\mathrm{u}} \qquad \text{austeniittisille ja duplex ruostumattomille teräksille} \qquad \text{(C.6)}$$

$$\varepsilon_\mathrm{u} = 0{,}6\left[1 - \frac{f_\mathrm{y}}{f_\mathrm{u}}\right] \qquad \text{ferriittisille ruostumattomille teräksille} \qquad \text{(C.7)}$$

mutta $\varepsilon_u \leq A$ missä A on standardin EN 10088 mukainen venymä murtumisen jälkeen.

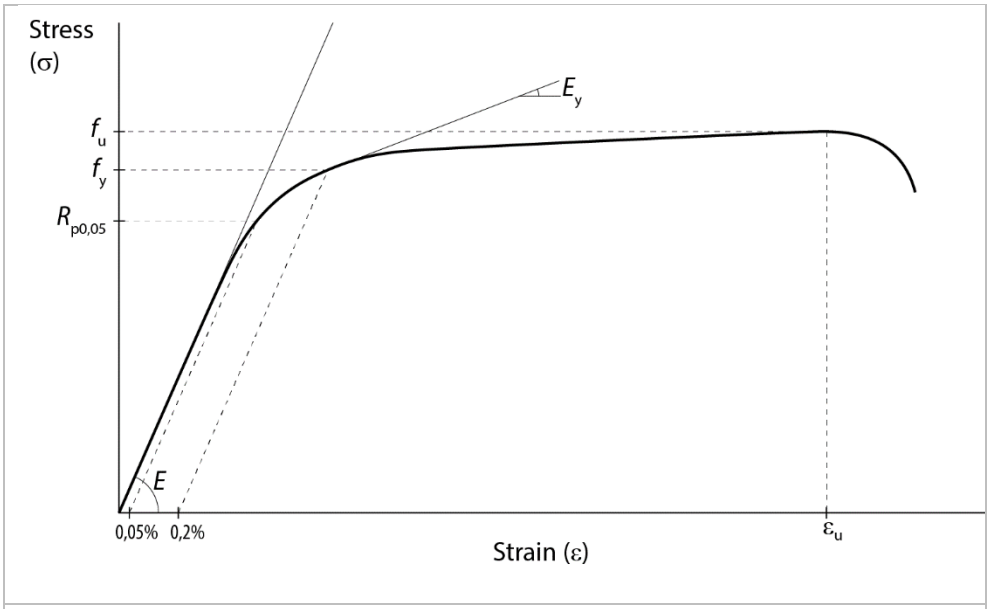
Standardissa EN 1993-1-4 tällä hetkellä esitetään ainoastaan yhtälö (C.6) mutta viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet tämän yhtälön olevan epätarkka ferriittisille ruostumattomille teräksille, ja siten on oletettavaa, että yhtälö (C.7) lisätään standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

$$m = 1 + 2{,}8\frac{f_y}{f_u}$$ kaikille ruostumattomilla teräslajeille (C.8)

Standardissa EN 1993-1-4 tällä hetkellä esitetään epätarkka yhtälö (C.9) tekijälle m. On oletettavaa, että yhtälö korvataan yhtälöllä (C.8) standardin EN 1993-1-4 seuraavassa revisiossa.

$$m = 1 + 3{,}5\frac{f_y}{f_u} \quad (C.9)$$

Kuvassa C.1 esitetään materiaalimallin olennaiset parametrit.



Kuva C.1 *Materiaalimallin olennaiset parametrit*

Mikäli myötölujuuden f_y mitattu arvo on saatavilla, murtolujuuden f_u arvo voidaan laskea seuraavista yhtälöistä:

$$\frac{f_y}{f_u} = 0{,}2 + 185\frac{f_y}{E}$$ austeniittisille ja duplex ruostumattomille teräksille (C.10)

$$\frac{f_y}{f_u} = 0{,}46 + 145\frac{f_y}{E}$$ ferriittisille ruostumattomille teräksille (C.11)

Yleisesti, kun suunnittelu perustuu FE-analyysiin, käytetään nimellisiä materiaaliominaisuuksia (tapaus 1, taulukko C.1). Analyysi voidaan tehdä myös perustuen testaamalla hankittuihin materiaaliominaisuuksiin (tapaukset 2-4 taulukossa C.1), tapauksesta riippuen mitä parametrien arvoja testeillä on mitattu.

Taulukko C.1 *Eri tapaukset jännitys-venymä-kuvaajan määrittämiseksi*

FE-analyysin tyyppi	E	f_y	f_u	ε_u	n	m
Tapaus 1. Suunnittelu perustuen nimellisiin ominaisuuksien arvoihin	Kohta 2.3.1	Kohta 2.3.1	Kohta 2.3.1	Yhtälö. (C.6) tai (C.7)	Taulukko 6.4	Yhtälö. (C.8)
Tapaus 2. Suunnittelu perustuen mitattuun f_y ainoastaan	Kohta 2.3.1	Mitattu	Yhtälö. (C.10) tai (C.11)	Yhtälö. (C.6) tai (C.7)	Taulukko 6.4	Yhtälö. (C.8)
Tapaus 3. Suunnittelu perustuen mitattuihin E, f_y ja f_u	Mitattu	Mitattu	Mitattu	Yhtälö. (C.6) tai (C.7)	Taulukko 6.4	Yhtälö. (C.8)
Tapaus 4. Suunnittelun/ mallin validointi käyttäen mitattua jännitys-venymä-kuvaajaa, esim. FE mallin validointiin	Mitattu	Mitattu	Mitattu	Mitattu	Mitattu tai sovitettu regressio tai yhtälö. (C.3)	Mitattu tai sovitettu regressio

Seuraavia yhtälöitä voidaan käyttää todellisen jännitys-venymä-kuvaajan määrittämiseen insinööri-jännitys-venymä-kuvaajasta:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \tag{C.12}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \tag{C.13}$$

Osa kaupallisista FE-analyysi ohjelmistoista edellyttävät materiaali määritysten perustuvan materiaalimallin plastiseen osaan. Näissä tapauksissa, jännityksen ja venymän arvot alkaen suhteellisuusrajalta tulisi esittää. Plastisen venymän arvo jokaisella jännitystasolla voidaan laskea yhtälöllä (C.14) ja suhteellisuusrajan voidaan olettaa olevan jännityksen arvo, joka vastaa plastista venymää $\varepsilon_{pl} = 1 \times 10^{-4}$.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{f_y}{E} \tag{C.14}$$

LIITE D Jatkuvan lujittumisen menetelmä

D.1 Yleistä

Jatkuvan lujittumisen menetelmä (CSM) on muodonmuutos-perusteinen suunnittelumenetelmä, joka ottaa huomioon myötölujittumisen ja elementin yhteisvaikutuksesta saatavan hyödyn poikkileikkauskestävyyden määrittämiseksi. CSM-menetelmän kimmoinen, lineaarisesti lujittuva materiaalimalli esitetään kohdassa D.2, kun taas CSM-menetelmän peruskuvaajat poikkileikkauksen muodonmuutoskapasiteetin määrittämiseksi esitetään kohdassa D.3. Kohdissa D.4, D.5 ja D.6 esitetään poikkileikkauksen kestävyyden suunnitteluyhtälöt.

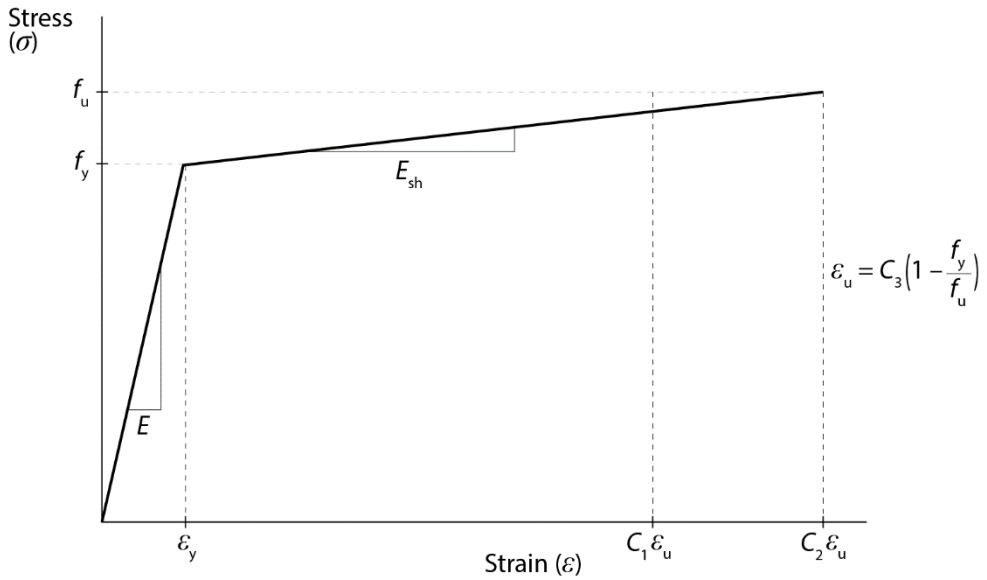
Tässä liitteessä esitetyt ohjeet soveltuvat levymäisten profiilien (esim. kaksoissymmetriset I-profiilit, RHS/SHS rakenneputket, mono-symmetriset U- ja T-profiilit ja epäsymmetriset L-profiilit) sekä CHS rakenneputkien poikkileikkauskestävyyden laskentaan, kun profiiliin kohdistuu joko yksittäinen tai yhdistetty kuormitus. Symmetrisille profiileille CSM-menetelmällä saadaan merkittävää hyötyä verrattuna kohdan 5 menettelyyn poikkileikkauskestävyyden mitoittamiseksi, kun poikkileikkaus hoikkuus on pieni, mutta vähäistä hyötyä, kun poikkileikkauksen hoikkuus on suurempi kuin 0,68 levymäisille profiileille tai 0,30 CHS rakenneputkille. Epäsymmetrisille profiileille, CSM-menetelmällä saadaan merkittävää hyötyä koko hoikkuusalueella.

Kylmämuovatuille poikkileikkauksille voidaan käyttää poikkileikkauksen keskimääräistä kohonnutta myötölujuutta f_{ya} liitteen B mukaisesti myötölujuuden f_{y} sijasta tässä liitteessä.

Tämän liitteen ohjeita sovelletaan vain staattisesti kuormitetuille rakenteille huoneenlämpötilassa. Käyttörajatilatarkastelut voivat oleellisesti ohjata suunnittelua, mikä pitää myös arvioida.

D.2 Materiaalin mallinnus

CSM-menetelmän elastinen, lineaarisesti lujittuva materiaalimalli esitetään kolmen materiaalimallia kuvaavan vakion (C_1, C_2 ja C_3) avulla. Nämä on esitetty kuvassa D.1 ja materiaalimallia kuvaavat vakiot taulukossa D.1.



Kuva D.1 *CSM-menetelmän elastinen, lineaarisesti lujittuva materiaalimalli*

CSM-menetelmän termit on määritelty seuraavasti:

f_y on myötölujuus

ε_y on myötövenymä, joka määritetään $\varepsilon_y = f_y/E$

E on kimmomoduli

E_{sh} on lujittumismoduli

f_u on murtolujuus

ε_u on murtolujuutta f_u vastaava murtovenymä, joka määritetään $C_3(1 - f_y/f_u)$

Taulukko D.1 *CSM-menetelmän materiaalimallin vakiot*

Ruostumaton terästyyppi	C_1	C_2	C_3
Austeniittinen	0,10	0,16	1,00
Duplex	0,10	0,16	1,00
Ferriittinen	0,40	0,45	0,60

Lujittumismoduli määritetään:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2\varepsilon_u - \varepsilon_y} \tag{D.1}$$

D.3 Poikkileikkauksen muodonmuutoskapasiteetti

D.3.1 Peruskuvaaja

Peruskuvaaja määrittää normalisoidun poikkileikkauksen muodonmuutoskapasiteetin $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$, joka edellytetään poikkileikkauskestävyyden määrittämiseksi. Peruskuvaaja määritetään yhtälöillä (D.2) ja (D.3).

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0{,}25}{\bar{\lambda}_p^{\,3{,}6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & kun\ \bar{\lambda}_p \leq 0{,}68 \\ \left(1 - \frac{0{,}222}{\bar{\lambda}_p^{\,1{,}050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{\,1{,}050}} & \text{kun } \bar{\lambda}_p > 0{,}68 \end{cases} \tag{D.2}$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{4{,}44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{\,4{,}5}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{kun } \bar{\lambda}_c \leq 0{,}30 \\ \left(1 - \frac{0{,}224}{\bar{\lambda}_c^{\,0{,}342}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_c^{\,0{,}342}} & \text{kun } \bar{\lambda}_c > 0{,}30 \end{cases} \tag{D.3}$$

missä

$\bar{\lambda}_p$ on levymäisten profiilien poikkileikkauksen hoikkuus

$\bar{\lambda}_c$ on CHS rakenneputkien poikkileikkauksen hoikkuus

D.3.2 Poikkileikkauksen hoikkuus

Poikkileikkauksen hoikkuus määritetään seuraavasti:

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / f_{cr,p}}$ levymäisille profiileille

$\bar{\lambda}_c = \sqrt{f_y / f_{cr,c}}$ CHS rakenneputkille

Levymäisille profiileille täyden poikkileikkauksen kimmoinen lommahdusjännitys vaikuttavalle kuormitukselle voidaan määrittää numeerisesti (esim. finite strip ohjelmalla CUFSM, saatavilla www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm) tai konservatiivisesti laskemalla poikkileikkauksen hoikimman levykentän elastinen lommahdusjännitys seuraavasti:

$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \upsilon^2)\bar{b}^2} \tag{D.4}$$

missä

$\bar{b}$ on levykentän tasaisen osuus leveys

t on levykentän aineenpaksuus

υ on Poisson vakio

k_σ on jännityssuhteesta ψ ja reunaehdoista riippuva lommahduskerroin, jonka arvo määritetään taulukoista 5.3 ja 5.4 tuetuille ja uloketaso-osille.

CHS rakenneputkille täyden poikkileikkauksen elastinen lommahdusjännitys puristukselle, taivutukselle ja näiden yhdistetylle kuormitukselle voidaan laskea:

$$f_{cr,c} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \upsilon^2)}} \frac{2t}{D} \tag{D.5}$$

missä

D on poikkileikkauksen halkaisija

t on poikkileikkauksen aineenpaksuus

D.4 Poikkileikkauksen puristuskestävyys

Levymäisille profiileille, joille $\bar{\lambda}_p \leq 0{,}68$ ja CHS rakenneputkille, joille $\bar{\lambda}_c \leq 0{,}30$, ja siten $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1{,}0$, poikkileikkauksen puristuskestävyys määritetään:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \tag{D.6}$$

missä,

A on poikkileikkauksen pinta-ala

f_{csm} on venymää ε_{csm} vastaava suunnittelujännitys, joka saadaan:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh}\varepsilon_y(\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y - 1) \tag{D.7}$$

Levymäisille profiileille, joille $\bar{\lambda}_p > 0{,}68$ ja CHS rakenneputkille, joille $\bar{\lambda}_c > 0{,}30$, ja siten $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1{,}0$, poikkileikkauksen puristuskestävyys määritetään:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \tag{D.8}$$

D.5 Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

D.5.1 Taivutus symmetria-akselin suhteen

Poikkileikkaukseltaan kaksoissymmetristen profiilien (esim. I-profiilit, RHS, SHS ja CHS) ja mono-symmetristen profiilien (U- ja T-profiilien) taivutuksessa symmetria-akselin suhteen, suurin saavutettavissa oleva venymä ε_{csm} määritetään yhtälöillä (D.2) tai (D.3).

Profiileille, joille $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1{,}0$, poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan määrittää:

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}\left[1 + \frac{E_{sh}}{E}\frac{W_{el}}{W_{pl}}\left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1\right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}}\right)\Big/\left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\right)^{\alpha}\right] \tag{D.9}$$

missä

W_{el} on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus

W_{pl} on plastisuusteorian mukainen taivutusvastus

α on CSM-menetelmän taivutusparametri, jonka arvo saadaan taulukosta D.2.

Profiileilla, joille $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1{,}0$, poikkileikkauksen taivutuskestävyys määritetään:

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \tag{D.10}$$

D.5.2 Taivutus muun kuin symmetria-akselin suhteen

Ei-symmetristen profiilien (L-profiilit) ja mono-symmetristen profiilien (U-profiilit) taivutuksessa muun kuin symmetria-akselin suhteen suurin saavutettavissa oleva puristuma $\varepsilon_{csm,c}$ määritetään yhtälöstä (D.2) (i.e. $\varepsilon_{csm,c} = \varepsilon_{csm}$), ja vastaavasti uloimman reunan venymä $\varepsilon_{csm,t}$ lasketaan perustuen lineaarisesti poikkileikkauksen

yli muuttuvaan venymään ja neutraaliakselin sijaintiin määritettynä kimmoisella jännitysjakaumalla (ENA). Suurin suunnittelussa käytettävä venymä $\varepsilon_{csm,max}$ on suurempi venymistä $\varepsilon_{csm,c}$ ja $\varepsilon_{csm,t}$.

Jos $\varepsilon_{csm,max}$ on pienempi kuin myötövenymä ε_y, neutraaliakselin sijainti ENA on soveltuva ja taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan yhtälöllä (D.10), käyttäen $\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{csm,max}$.

Jos $\varepsilon_{csm,max}$ on suurempi kuin myötövenymä ε_y, neutraaliakselin sijainti muutetaan aiemmin oletetusta sijainnista ENA poikkileikkauksen tasapainotilan perusteella määräytyvään sijaintiin tai, likiarvona, kimmoisen ja plastisen neutraaliakselin sijaintien puoliväliin; $\varepsilon_{csm,t}$ ja $\varepsilon_{csm,max}$ arvot voidaan sitten laskea uudelleen ja vastaavasti taivutuskestävyyden mitoitusarvo määritetään yhtälöllä (D.9), missä $\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{csm,max}$ ja taivutusparametrin α arvo ei-kaksoissymmetriselle poikkileikkaukselletaivutusmomentin vaikuttaessa sen akselin suhteen, joka ei ole symmetria-akseli, saadaan taulukosta D.2.

Taulukko D.2 *CSM-menetelmän taivutusparametri α*

Poikkileikkauksen tyyppi	Taivutus akselin suhteen	Sivusuhde	α
RHS	Kaikki	Kaikki	2,0
CHS	Kaikki	–	2,0
I-profiili	y-y	Kaikki	2,0
	z-z	Kaikki	1,2
U-profiili	y-y	Kaikki	2,0
	z-z	$h/b \leq 2$	1,5
		$h/b > 2$	1,0
T-profiili	y-y	$h/b < 1$	1,0
		$h/b \geq 1$	1,5
	z-z	Kaikki	1,2
L-profiili	y-y	Kaikki	1,5
	z-z	Kaikki	1,0

D.6 Poikkileikkauskestävyys yhdistetylle puristukselle ja taivutusmomentille

D.6.1 RHS/SHS rakenneputket kuormitettuna yhdistetyllä kuormituksella

RHS/SHS rakenneputkilla, joilla $\bar{\lambda}_p \leq 0{,}60$, yhteisvaikutuskaava, kun poikkileikkauksessa vaikuttaa taivutus vahvemman akselin suhteen, heikomman akselin suhteen tai molempien akselien suhteen sekä puristus, on esitetty yhtälöillä (D.11) to (D.13):

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd}\frac{(1-n_{csm})}{(1-0{,}5a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \qquad \text{(D.11)}$$

$$M_{z,Ed} \leq M_{R,csm,z,Rd} = M_{csm,z,Rd}\frac{(1-n_{csm})}{(1-0{,}5a_f)} \leq M_{csm,z,Rd} \qquad \text{(D.12)}$$

$$\left[\frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}}}\right]^{\alpha_{\mathrm{csm}}} + \left[\frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{M_{\mathrm{R,csm,z,Rd}}}\right]^{\beta_{\mathrm{csm}}} \leq 1 \tag{D.13}$$

missä,

$M_{\mathrm{y,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitusarvo vahvemman akselin (y-y) suhteen

$M_{\mathrm{z,Ed}}$ on taivutusmomentin mitoitus arvo heikomman akselin (z-z) suhteen

$M_{\mathrm{R,csm,y,Rd}}$ on pienennetty CSM-menetelmän taivutuskestävyys vahvemman akselin (y-y) suhteen

$M_{\mathrm{R,csm,z,Rd}}$ on pienennetty CSM-menetelmän taivutuskestävyys heikomman akselin (z-z) suhteen

a_{w} on uuman poikkileikkauspinta-alan suhde koko poikkileikkauksen pinta-alaan

a_{f} on laippojen poikkileikkauspinta-alan suhde koko poikkileikkauksen pinta-alaan

n_{csm} on puristavan aksiaalivoiman mitoitusarvon N_{Ed} suhde CSM-menetelmän puristavan aksiaalivoiman kestävyyteen $N_{\mathrm{csm,Rd}}$

α_{csm} ja β_{csm} ovat yhteisvaiktustekijöitä kahden akselin suhteen vaikuttavalle taivutukselle ja määritetään $1{,}66/(1 - 1{,}13{n_{\mathrm{csm}}}^{2})$

RHS/SHS rakenneputkille, joille $\bar{\lambda}_{\mathrm{p}} > 0{,}60$, lineaarinen yhteisvaikutuskaava on:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{csm,Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{csm,y,Rd}}} + \frac{M_{z,\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{csm,z,Rd}}} \leq 1 \tag{D.14}$$

D.6.2 CHS rakenneputket yhdistetylle kuormitukselle

CHS rakenneputkille, joille $\bar{\lambda}_{\mathrm{c}} \leq 0{,}27$, yhteisvaikutuskaava, kun poikkileikkaukseen vaikuttaa Yhdistetty taivutus ja puristus, on seuraava:

$$M_{\mathrm{Ed}} \leq M_{\mathrm{R,csm,Rd}} = M_{\mathrm{csm,Rd}}(1 - {n_{\mathrm{csm}}}^{1{,}7}) \tag{D.15}$$

CHS rakenneputkille, joille $\bar{\lambda}_{c} > 0{,}27$, yhteisvaikutuskaava on:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{csm,Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{csm,Rd}}} \leq 1 \tag{D.16}$$

LIITE E Kriittinen kiepahdusmomentti kimmoteorian mukaan

E.1 Yleistä

Poikkileikkauksille, jotka ovat symmetrisiä taivutustason suhteen, kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti M_{cr} voidaan laskea kohdassa E.2 esitetyllä menetelmällä. Tapauksille, joille tämä menetelmä ei sovellu, M_{cr} voidaan määrittää palkin nurjahdusanalyysillä edellyttäen, että laskennassa otetaan huomioon kaikki tekijät, jotka voivat vaikuttaa M_{cr} arvoon:

- poikkileikkauksen geometria
- käyristymisjäykkyys
- pystysuuntaisen kuorman vaikutuspisteen sijainti leikkauskeskiön sijaintiin nähden
- reunaehdot

Ohjelmisto kriittisen momentin M_{cr} laskemiseksi on ladattavissa web-sivustolta: www.cticm.com ja www.steelconstruction.info/Design_software_and_tools.

E.2 Taivutuksen tasossa symmetriset poikkileikkaukset

Tämä menetelmä soveltuu suorille ja poikkileikkaukseltaan vakioille rakenneosille ja joiden poikkileikkaus on symmetrinen taivutustasossa. Reunaehdot palkin molemmissa päissä ovat vähintään:

- sivusuuntainen liike on tuettu
- kiertymä pituusakselin suhteen on tuettu

M_{cr} voidaan laskea nurjahdusteorian perusteella laaditulla yhtälöllä

$$M_{\mathrm{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{\mathrm{k_w}}\right)^2 \frac{I_{\mathrm{w}}}{I_{\mathrm{z}}} + \frac{(kL)^2 G I_{\mathrm{t}}}{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}} + (C_2 z_{\mathrm{g}})^2} - C_2 z_{\mathrm{g}} \right\} \tag{E.1}$$

missä:

I_{t} on vääntöjäyhyys

I_{w} on käyristymisjäyhyys

I_{z} on jäyhyysmomentti heikomman akselin suhteen

k ja k_{w} ovat tehollisen pituuden kertoimet

L on palkin pituus sivuttaistukien välillä

z_{g} on kuorman sijainnin etäisyys leikkauskeskiöstä.
Huom.: kaksoissymmetrisillä poikkileikkauksilla leikkauskeskiö sijaitsee painopisteessä

C_1 on ekvivalentin tasan jakautuneen momentin kerroin, joka ottaa huomioon momentin jakauman

C_2 on kuormitustasoon liittyvä parametri ja se on riippuvainen taivutusmomenttijakauman muodosta.

Tekijällä k viitataan sauvan pään kiertymään. Se on analoginen puristetun sauvan suhteelle nurjahduspituus systeemipituuteen verrattuna. Tekijän k arvoa ei pitäisi valita pienemmäksi kuin 1,0 ilman selkeää perustelua.

Tekijällä k_w viitataan sauvan pään käyristymiseen. Ellei poikkileikkauksen käyristymisreunaehdolle anneta erityisiä ohjeita, tekijän k_w arvoksi otetaan 1,0.

Tavallisimmalle tuentaehdolle (haarukkatuenta), tekijöiden k ja k_w arvoiksi otetaan 1,0.

Yleisessä tapauksessa, termin z_g arvo on positiivinen, kun voimat vaikuttavat kohti leikkauskeskiötä.

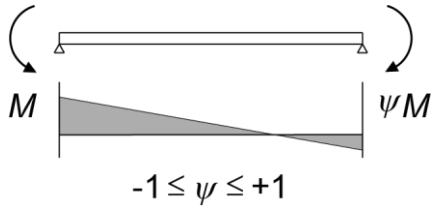
E.3 Tekijät C_1 ja C_2

Taivutusmomentin jakauma palkin jännevälillä vaikuttaa kimmoisen kriittisen momentin arvoon. Taivutusmomentin jakauman vaikutus palkin kimmoiseen nurjahdusmomenttiin M_{cr} voidaan määrittää ekvivalenttia jännevälillä vaikuttavaa tasan jakaantunutta momenttia kuvaavan kertoimen C_1 avulla. Jännevälillä vaikuttava tasan jakaantunut taivutusmomentti on vakavin kuormitus, jolle $C_1 = 1{,}0$. Valitsemalla $C_1 = 1{,}0$ on myös konservatiivinen muille taivutusmomentin jakaumille, mutta voi tulla turhan konservatiiviseksi, kun taivutusmomentin jakauma eroaa merkittävästi tasan jakaantuneesta momentista.

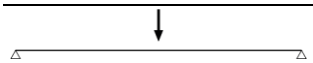
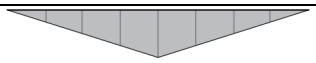
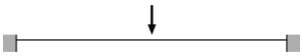
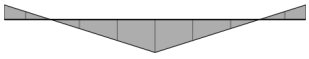
Tekijä C_2 tulee merkitseväksi silloin kun palkkiin kohdistuu sen stabiiliutta horjuttavia voimia. Voimilla, jotka vaikuttavat leikkauskeskiön yläpuolella, on palkin "stabiiliutta horjuttava" vaikutus, joiden tuloksena kimmoisen kriittisen momentin M_{cr} arvo pienenee, kun taas voimilla, jotka vaikuttavat leikkauskeskiön alapuolella on "vakauttava" vaikutus ja tuloksena korkeampi M_{cr} arvo.

Taulukoissa E.1 ja E.2 annetaan arvot tekijöille C_1 ja C_2.

Taulukko E.1 *Tekijän C_1 arvot sauvan päiden momenttien eri suhteilla (kun k =1,0)*

Sauvan päiden momentit ja tuen reunaehto	ψ	C_1
	+1,00	1,00
	+0,75	1,17
	+0,50	1,36
	+0,25	1,56
	0,00	1,77
	-0,25	2,00
	-0,5	2,24
	-0,75	2,49
	-1,00	2,76

Taulukko E.2 *Tekijöiden C_1 ja C_2 poikittaiselle kuormitukselle (kun k =1,0)*

Kuormitustapaukset ja tuen reunaehdot	Taivutusmomentin jakauma	C_1	C_2
		1,13	0,454
		2,60	1,55
		1,35	0,630
		1,69	1,65

OSA II – MITOITUSESIMERKIT

Käsikirjan tässä osassa esitetään 15 mitoitusesimerkkiä, joilla havainnollistetaan mitoitusyhtälöiden käyttöä. Mitoitusesimerkit ovat:

Mitoitusesimerkki 1

Poikkileikkaukseltaan pyöreän rakenneputken mitoitus aksiaalisuuntaiselle puristukselle.

Mitoitusesimerkki 2

Hitsatun, poikkileikkausluokan 4 I-palkin mitoitus yhdistetylle taivutukselle ja aksiaalisuuntaiselle puristukselle.

Mitoitusesimerkki 3

Poikkileikkausluokan 4 muotolevykatteen mitoitus taivutukselle.

Mitoitusesimerkki 4

Rakenneputkiliitoksen mitoitus väsyttävälle kuormalle.

Mitoitusesimerkki 5

Hitsatun liitoksen mitoitus.

Mitoitusesimerkki 6

Ruuviliitoksen mitoitus.

Mitoitusesimerkki 7

Poikkileikkausluokan 4 levypalkin mitoitus taivutukselle. Leikkauslommahdus on kriittinen.

Mitoitusesimerkki 8

Poikkileikkausluokan 4 levypalkin mitoitus taivutukselle Pistevoimakestävyys on kriittinen.

Mitoitusesimerkki 9

Kylmämuovatun U-profiilin mitoitus taivutukselle, kun puristettu laippa on sivusuunnassa tuettu välituella. Kiepahdus tukien välillä on kriittinen.

Mitoitusesimerkki 10

Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisen rakenneputken palotilanteen mitoitus yhdistetylle aksiaalisuuntaiselle puristukselle ja taivutukselle 30 minuutin palonkestoajalle.

Mitoitusesimerkki 11

Poikkileikkausluokan 4 muotolevykatteen mitoitus taivutukselle – vertailu kun muotolevykate on valmistettu hehkuten tilan materiaalista ja kylmämuokatun tilan materiaalista.

Mitoitusesimerkki 12

Kylmämuokatusta materiaalista valmistetun, reunajäykistetyn U-profiilin mitoitus taivutukselle.

Mitoitusesimerkki 13

Ruostumattomista rakenneputkista valmistetun ristikon sauvojen mitoitus 30 minuutin palonkestoajalle.

Mitoitusesimerkki 14

Poikkileikkaukseltaan neliömäisen rakenneputken valmistuksessa tapahtuneen kylmämuovauksen vaikutuksesta kohonneen keskimääräisen korotetun myötölujuuden määrittäminen liitteen B mukaisesti.

Mitoitusesimerkki 15

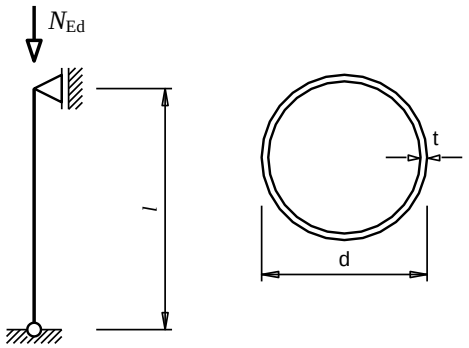
Poikkileikkaukseltaan neliömäisen rakenneputken taivutuskestävyyden määrittäminen jatkuvan lujittumisen menetelmällä (CSM) liitteen D mukaisesti.

Muotolevy mitoitusesimerkissä 3 on valmistettu ferriittisestä teräslajista 1.4003. Levypalkit mitoitusesimerkeissä 7 ja 8 on valmistettu duplex teräslajista 1.4462. Rakenneosat Muissa mitoitusesimerkeissä on valmistettu austeniittisista teräslajeista 1.4301 tai 1.4401.

Mitoitusesimerkin marginaalissa esitetyt referenssit viittaavat käsikirjan tiettyyn kohtaan, taulukkoon tai mitoitusyhtälöön, ellei erityisesti ole viitattu eurokoodi-standardeihin.

ESIMERKKI 1 – AKSIAALISESTI PURISTETTU PYÖREÄ RAKENNEPUTKI

Pyöreän rakenneputken mitoitus keskeiselle puritusvoimalle. Pilari on molemmista päistään nivelellisesti tuettu. Pilarin pituus on 3,50 m.



Rakenne

Molemmista päistään nivelellisesti tuettu pilari. Pilarin pituus:

l = 3,50 m

Kuormitukset

Pysyvistä ja muuttuvista kuormista aiheutuvan puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa (ao. arvo sisältää siis kuorman osavarmuusluvut):

N_{Sd} = 250 kN

Poikkileikkaussuureet

Kokeillaan kylmämuovattua, poikkileikkaukseltaan pyöreää rakenneputkea 159 × 4, teräslaji 1.4307.

Geomnetriset ominaisuudet

d	=	159 mm	t	=	4 mm
A_g	=	19,5 cm²	I	=	585,3 cm^4
W_{el}	=	73,6 cm^3	W_{pl}	=	96,1 cm^3

Materiaaliominaisuudet

Käytetään f_y = 220 N/mm^2 (kylmävalssattu nauha)). Taul. 2.2

E = 200000 N/mm^2 ja G = 76900 N/mm^2 Kohta 2.3.1

Poikkileikkausluokka

$\varepsilon = 1{,}01$ — Taul. 5.2

Puristettu poikkileikkuas: $d/t = 159/4 = 39{,}8$

Poikkileikkausluokalle 1, $d/t \leq 50\varepsilon^2$, siten kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Poikkileikkauksen puristuskestävyys — Section 5.7.3

Poikkileikkausluokalle 1 saadaan:

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$$ — Kaava 5.27

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{19{,}5 \times 220 \times 10^{-1}}{1{,}1} = 390 \text{ kN}$$

Taivutusnurjahduskestävyys — Kohta 6.3.3

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \chi A f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$$ — Kaava 6.2

$$\chi = \frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0{,}5}} \leq 1$$ — Kaava 6.4

$$\varphi = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$ — Kaava 6.5

Lasketaan nurjahduksen kimmoinen kriittinen voima:

$$N_{\mathrm{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{{L_{\mathrm{cr}}}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 585{,}3 \times 10^4}{(3{,}50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 943{,}1 \text{ kN}$$

Lasketaan dimensioton hoikkuus taivutusnurjahduksessa:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{19{,}5 \times 10^2 \times 220}{943{,}1 \times 10^3}} = 0{,}67$$ — Kaava 6.6

Epätäydellisyystekijä $\alpha = 0{,}49$ ja $\bar{\lambda}_0 = 0{,}2$ kylmämuovatuille poikkileikkaukseltaan pyöreille rakenneputkille CHS: — Taul. 6.1

$$\phi = 0{,}5 \times (1 + 0{,}49 \times (0{,}67 - 0{,}2) + 0{,}67^2) = 0{,}84$$

$$\chi = \frac{1}{0{,}84 + [0{,}84^2 - 0{,}67^2]^{0{,}5}} = 0{,}74$$

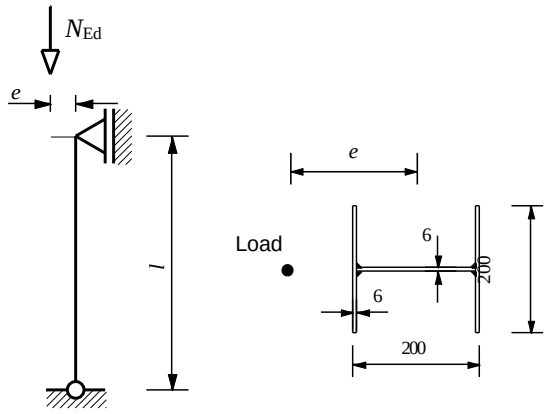
$$N_{\mathrm{b,Rd}} = 0{,}74 \times 19{,}5 \times 220 \times \frac{10^{-1}}{1{,}1} = 288{,}6 \text{ kN}$$

Aksiaalivoiman suunnitteluarrvo on $N_{\mathrm{Ed}} = 250$ kN.

Siten sauvan taivutusnurjahduskestävyys on riittävä.

MITOITUSESIMERKKI 2 –HITSATTU PILARI, JOKA ON SIVUSUUNNASSA TUETTU

Hitsattu I-profiili pilarina, joka on tuettu nivelellisesti molemmista päistään. Nurjahdus heikomman akselin suhteen on estetty. Pilarin pituus on 3,50 m. Pilaria kuormittaa epäkeskeinen puristusvoima.



Rakenne

Molemmista päistään nivelellisesti tuettu pilari. Pituus:

l = 3,50 m

Kuorman epäkeskeisyys:

e = 200 mm

Kuormitukset

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama puristusvoiman mitoitusarvo on:

N_{Sd} = 120 kN

Kuormitukset

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama puristusvoiman mitoitusarvo on:

$M_{y,\max Ed}$ = $120 \times 0{,}20$ = 24 kNm

Poikkileikkauksen ominaisuudet

Kokeillaan kaksoissymmetristä I-profiilia 200 × 200, ainepaksuus on 6 mm, teräslaji 1.4401

Geometriset ominaisuudet

b	=	200 mm	t_f	=	6,0 mm	$W_{el,y}$	=	259,1 cm^3
h_w	=	188 mm	t_w	=	6,0 mm	$W_{pl,y}$	=	285,8 cm^3

a = 3,0 mm (hitsin paksuus) I_y = 2591,1 cm^4
A_g = 35,3 cm² i_y = 8,6 cm

Materiaaliominaisuudet

f_y = 220 N/mm^2 (kuumavalssattu nauha). Taul. 2.2
E = 200000 N/mm^2 ja G = 76900 N/mm^2 Kohta 2.3

Poikkileikkausluokka Taul. 5.2

ε = 1,01

Uuman puristus:

$$c/t = \frac{(188 - 3 - 3)}{6} = 30{,}3$$

Poikkileikkausluokalle 1, $c/t \leq 33{,}0\varepsilon$, joten uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Yhdeltä reunaltaan tuettu puristettu laippa:

$$c/t = \frac{(200/2 - 6/2 - 3)}{6} = 94/6 = 15{,}7$$

Poikkileikkausluokalle 3, $c/t \leq 14{,}0\varepsilon$, joten laippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

Koko profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

Teholliset poikkileikkausominaisuudet

Uuma on täysin tehollinen:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}188}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} \text{ but } \leq 1$$ Kaava 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{missä } \bar{b} = c = 94 \text{ mm}$$ Kaava 5.3

Olettamalla laipan puristusjännitys tasan jakaantuneeksi saadaan:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$$

$\Rightarrow k_\sigma$ = 0,43 Taul. 5.4

$$\bar{\lambda}_p = \frac{94/6}{28{,}4 \times 1{,}01 \times \sqrt{0{,}43}} = 0{,}833$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}188}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} = \frac{1}{0{,}833} - \frac{0{,}188}{0{,}833^2} = 0{,}93$$

$b_{\text{eff}} = 0{,}93 \times 94 = 87{,}4$ mm

Lasketaan tehollinen poikkileikkaus, kun vain puristusvoima vaikuttaa. Saadaan:

$A_{\text{eff}} = A_g - 4(1-\rho)ct = 35{,}3 - 4 \times (1 - 0{,}93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 33{,}7$ cm^2

Lasketaan tehollinen poikkileikkaus vahvemman akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa:

$A_{\text{eff}} = A_g - 2(1-\rho)ct = 35{,}3 - 2 \times (1 - 0{,}93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 34{,}5$ cm^2

Lasketaan neutraaliakselin siirtyminen:

$$\bar{z}' = \frac{2 \times (1-\rho)ct \times (h_w + t_f)/2}{A_{eff}} = \frac{2 \times (1-0{,}93) \times 94 \times 6 \times (188+6)/2}{34{,}5 \times 10^{-2}}$$

= 2,2 mm siirtymä poispäin puristetusta laipasta.

Lasketaan tehollinen hitausmomentti vahvemman akselin suhteen. Saadaan:

$$I_{eff,y} = I_y - 2(1-\rho)ct\left[\frac{t^2}{12} + \frac{(h_w + t_f)^2}{4}\right] - \bar{z}'^2 A_{eff}$$

$$I_{eff,y} = 2591{,}1 - 2 \times (1-0{,}93) \times 94 \times 6 \times \left[\frac{6^2}{12} + \frac{(188+6)^2}{4}\right] \times 10^{-4} - (2{,}2)^2 \times 34{,}5 \times 10^{-2}$$

$$I_{eff,y} = 2515{,}1 \text{ cm}^4$$

$$W_{eff,y} = \frac{I_{eff,y}}{\frac{h_w}{2} + t_f + \bar{z}'} = \frac{2515{,}1}{\frac{18{,}8}{2} + 0{,}6 + 0{,}22} = 246{,}1 \text{ cm}^3$$

Taivutusnurjahduskestävyys vahvemman akselin suhteen

$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1}$ — Kaava 6.3

$A_{eff} = 33{,}7 \text{ cm}^2$ poikkileikkausluokalle 4

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \left[\varphi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0,5}} \leq 1$$ — Kaava 6.4

$$\varphi = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$ — Kaava 6.5

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$ — Kaava 6.7

$L_{cr} = 350$ cm (nurjahduspituus on sama kuin todellinen pituus)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{{L_{cr}}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2591{,}1 \times 10^4}{350^2 \times 10^2} \times 10^{-3} = 4175{,}2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{33{,}7 \times 10^2 \times 220}{4175{,}2 \times 10^3}} = 0{,}421$$

Hitsatuille avoprofiileille vahvemman akselin suhteen tapahtuvassa nurjahduksessa epätäydellisyystekijä $\alpha = 0{,}49$ ja $\bar{\lambda}_0 = 0{,}2$: — Taul. 6.1

$$\varphi = 0{,}5 \times (1 + 0{,}49 \times (0{,}421 - 0{,}2) + 0{,}421^2) = 0{,}643$$

$$\chi = \frac{1}{0{,}643 + [0{,}643^2 - 0{,}421^2]^{0,5}} = 0{,}886$$

$$N_{b,Rd,y} = 0{,}886 \times 33{,}7 \times 10^2 \times 220 \times 10^{-3} / 1{,}1 = 597{,}23 \text{ kN}$$

Kestävyys yhdistetyllä aksiaalisuuntaiselle puristukselle ja taivutukselle

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{\left(N_{\mathrm{b,Rd}}\right)_{\min}} + k_{\mathrm{y}} \frac{M_{\mathrm{y,Ed}} + N_{\mathrm{Ed}} e_{\mathrm{Ny}}}{\beta_{\mathrm{W,y}}\, W_{\mathrm{pl,y}}\, f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M1}}} \leq 1$$ Kaava 6.56

$\beta_{\mathrm{W,y}}$ = $W_{\mathrm{eff}}/W_{\mathrm{pl,y}}$ poikkileikkausluokalle 4

= 246,1/285,8 = 0,861

e_{Ny} = 0

$$k_{\mathrm{y}} = 1{,}0 + 2\left(\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} - 0{,}5\right)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} = 1{,}0 + 2 \times (0{,}421 - 0{,}5) \times \frac{120{,}0}{597{,}23} = 0{,}968$$ Kaava 6.61

$$1{,}2 + \frac{2N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd,y}}} = 1{,}2 + \frac{2 \times 120}{597{,}23} = 1{,}60$$

mutta $1{,}2 \leq k_{\mathrm{y}} \leq 1{,}60$

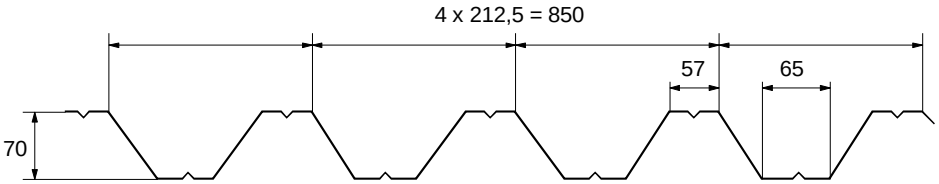
$\therefore k_{\mathrm{y}} = 1{,}2$

$$\frac{120{,}0}{597{,}23} + 1{,}2 \times \frac{24{,}0 \times 10^6}{0{,}861 \times 285{,}8 \times 10^3 \times 220/1{,}1} = 0{,}786 \leq 1$$

Sauvan kestävyys on riittävä.

ESIMERKKI 3 – POIKKILEIKKAUSLUOKKAAN 4 KUULUVA KATON TAIVUTETTU MUOTOLEVY

Tämä esimerkki koskee kaksiaukkoisen katon muotolevyn mitoitusta. Teräslaji on ferriittinen ruostumaton teräs 1.4003 ja ainepaksuus on 0,6 mm. Mitat esitetään alla olevassa kuvassa.

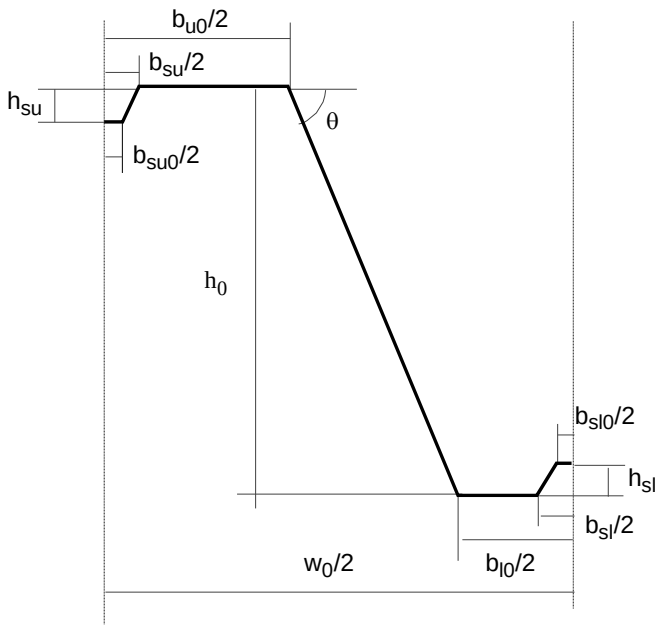


Esimerkki koostuu seuraavista tehtävistä:
- tehollisten poikkileikkausarvojen määrittäminen murtorajatilassa
- taivutuskestävyyden määrittäminen
- kestävyyden määrittäminen välituella
- taipumien määrittäminen käyttörajatilassa.

Lähtötiedot

Jännevälit	L	=	2900 mm	
Tukien leveys	s_s	=	100 mm	
Mitoituskuorma	Q	=	1,4 kN/m^2	
Oma paino	G	=	0,07 kN/m^2	
Laskentapaksuus	t	=	0,6 mm	
Myötölujuus	f_y	=	280 N/mm^2	Taul 2.2
Kimmomoduli	E	=	200000 N/mm^2	Kohta 2.3.1
Osavarmuusluku	γ_{M0}	=	1,1	Taul. 4.1
Osavarmuusluku	γ_{M1}	=	1,1	Taul. 4.1
Kuormakerroin	γ_G	=	1,35	Kohta 4.3
Kuormakerroin	γ_Q	=	1,5	Kohta 4.3

Merkinnät ja mitat esitetään alla olevassa kuvassa. Kuvan mukaisen profiilin ylälaippa on taivutuksesta johtuen puristettu tuella



Keskilinjan mitat:
$h_0 = 70$ mm
$w_0 = 212{,}5$ mm
$b_{u0} = 65$ mm
$b_{l0} = 57$ mm
$b_{su} = 20$ mm
$b_{su0} = 8$ mm
$h_{su} = 6$ mm
$b_{sl} = 20$ mm
$b_{s10} = 8$ mm
$h_{sl} = 6$ mm

$r = 2$ mm (sisäpuolinen nurkkasäde)

Uuman kaltevuuskulma:

$$\theta = \text{atan}\left|\frac{h_0}{0{,}5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})}\right| = \text{atan}\left|\frac{70}{0{,}5 \times (212{,}5 - 65 - 57)}\right| = 57{,}1°$$

Tehollinen poikkileikkaus murtorajatilassa (ULS) — Kohta 5.2

Tarkistetaan leveys-paksuussuhteen maksimiarvot:

$h_0/t = 70/0{,}6 = 117 \leq 400\sin\theta = 336$ — Taul. 5.1

$\max(b_{l0}/t\,;\, b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0{,}6 = 108 \leq 400$ — Taul. 5.1

Uumalevyn kulma ja nurkkasäde:

$45° \leq \theta = 57{,}1° \leq 90°$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22{,}5 \text{ mm}$$

Nurkan pyöristystä ei oteta poikkileikkauskestävyyden laskennassa, mikäli nurkan sisäsäde $r \leq 5t$ ja $r \leq 0{,}10 b_p$

$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t\,;\, 0{,}1 b_p) = \min(5 \times 0{,}6; 0{,}1 \times 22{,}5) = 2{,}25$ mm — Kohta 5.6.2

Nurkan pyöristyksen vaikutus poikkileikkauskestävyyteen voidaan jättää huomioon ottamatta.

Painopisteakselin sijainti, kun uuma toimii täysin tehollisena

Lasketaan pienennystekijä ρ puristetun laipan teholliselle leveydelle:

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^2} \; mutta \; \leq 1$$

Kohta 5.4.1
Kaava 5.1

missä

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

Kaava 5.3

$\bar{b} = b_p = 22{,}5$ mm

$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$ — Taul. 5.3

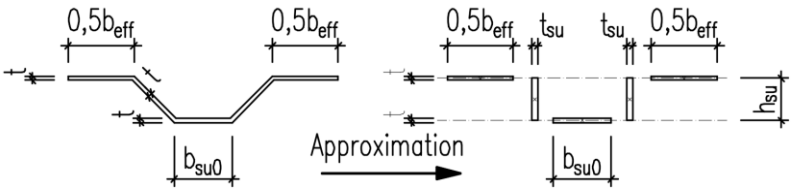
$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} = \left[\frac{235}{280}\times\frac{200\,000}{210\,000}\right]^{0,5} = 0{,}894$$ Taul. 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{22{,}5/0{,}6}{28{,}4\times 0{,}894\times\sqrt{4}} = 0{,}738$$ Kaava 5.3

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0{,}772}{0{,}738} - \frac{0{,}079}{0{,}738^2} = 0{,}901 \le 1$$

$$b_{\mathrm{eff,u}} = \rho\bar{b} = 0{,}901\times 22{,}5 = 20{,}3\ \mathrm{mm}$$ Taul. 5.3

Jäykisteen teholliset ominaisuudet Kohta 5.5.3



$$t_{su} = \frac{\sqrt{{h_{su}}^2 + \left(\frac{b_{su}-b_{su0}}{2}\right)^2}}{h_{su}}t = \frac{\sqrt{6^2+\left(\frac{20-8}{2}\right)^2}}{6}\times 0{,}6 = 0{,}849\ \mathrm{mm}$$

$$A_s = (b_{\mathrm{eff,u}} + b_{su0})t + 2h_{su}t_{su} = (20{,}3+8)\times 0{,}6 + 2\times 6\times 0{,}849 = 27{,}2\ \mathrm{mm}^2$$ Kuva 5.3

$$e_s = \frac{b_{su0}h_{su}t + 2h_{su}\frac{h_{su}}{2}t_{su}}{A_s} = \frac{8\times 6\times 0{,}6 + 2\times 6\times\frac{6}{2}\times 0{,}849}{27{,}2} = 2{,}18\ \mathrm{mm}$$

$$I_s = 2(15t^2{e_s}^2) + b_{su0}t(h_{su}-e_s)^2 + 2h_{su}t_{su}\left(\frac{h_{su}}{2}-e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{su0}t^3}{12} + 2\frac{t_{su}{h_{su}}^3}{12}$$ Kuva 5.3

$$I_s = 2\times(15\times 0{,}6^2\times 2{,}18^2) + 8\times 0{,}6\times(6-2{,}18)^2 + 2\times 6\times 0{,}849\times\left(\frac{6}{2}-2{,}18\right)^2 + 2\times\left(\frac{15\times 0{,}6^4}{12}\right) + \frac{8\times 0{,}6^3}{12} + 2\times\frac{0{,}849\times 6^3}{12} = 159{,}25\ \mathrm{mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{{h_{su}}^2 + \left(\frac{b_{su}-b_{su0}}{2}\right)^2} + b_{su0} = 2\times\sqrt{6^2+\left(\frac{20-8}{2}\right)^2} + 8 = 25{,}0\ \mathrm{mm}$$

$$l_b = 3{,}07\left[I_s{b_p}^2\left(\frac{2b_p+3b_s}{t^3}\right)\right]^{1/4}$$ Kaava 5.10

$$l_b = 3{,}07\times\left[159{,}25\times 22{,}5^2\times\left(\frac{2\times 22{,}5+3\times 25}{0{,}6^3}\right)\right]^{1/4} = 251\ \mathrm{mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0-b_{u0}-b_{l0}}{2}\right)^2 + {h_0}^2} = \sqrt{\left(\frac{212{,}5-65-57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83{,}4\ \mathrm{mm}$$ Kuva 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2\times 22{,}5 + 25 = 70\ \mathrm{mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0{,}5b_d}} = \sqrt{\frac{83{,}4 + 2 \times 70}{83{,}4 + 0{,}5 \times 70}} = 1{,}37$$ Kaava 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83{,}4} = 3{,}01 \geq 2 \quad \Rightarrow \quad k_w = k_{w0} = 1{,}37$$ Kaava 5.8

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2k_w E}{A_s}\sqrt{\frac{I_s t^3}{4{b_p}^2(2b_p + 3b_s)}}$$ Kaava 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2 \times 1{,}37 \times 200 \times 10^3}{27{,}2} \times \sqrt{\frac{159{,}25 \times 0{,}6^3}{4 \times 22{,}5^2 \times (2 \times 22{,}5 + 3 \times 25)}} = 503{,}4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{280}{503{,}4}} = 0{,}746$$

$$0{,}65 < \bar{\lambda}_d = 0{,}746 < 1{,}38 \quad \Rightarrow$$ Kaava 5.17

$$\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_d = 1{,}47 - 0{,}723 \times 0{,}746 = 0{,}93$$

$$t_{red,u} = \chi_d\, t = 0{,}93 \times 0{,}6 = 0{,}558 \text{ mm}$$

Neutraaliakselin paikka puristetusta laipasta:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{{h_{sl}}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}}\, t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20-8}{2}\right)^2}}{6} \times 0{,}6 = 0{,}849 \text{ mm}$$

$$t_w = t/\sin\theta = 0{,}6/\sin(57{,}1°) = 0{,}714 \text{ mm}$$

e_i [mm]	A_i [mm^2]
0	$0{,}5b_{eff,u}\, t = 6{,}1$
0	$0{,}5b_{eff,u}\, \chi_d\, t = 5{,}66$
$0{,}5h_{su} = 3$	$h_{su}\, \chi_d t_{su} = 4{,}74$
$h_{su} = 6$	$0{,}5b_{su0}\, \chi_d\, t = 2{,}23$
$0{,}5h_0 = 35$	$h_0 t_w = 49{,}98$
$h_0 = 70$	$0{,}5(b_{l0} - b_{sl})\, t = 11{,}1$
$h_0 - 0{,}5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5{,}09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0{,}5b_{sl0} t = 2{,}4$

$$A_{tot} = \sum A_i = 87{,}3 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 34{,}9 \text{ mm}$$

Uuman puristetun alueen tehollinen leveys

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0{,}76t\sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0}\, \sigma_{com,Ed}}} = 0{,}76 \times 0{,}6 \times \sqrt{\frac{200}{1{,}1 \times 280 \times 10^{-3}}} = 11{,}6 \text{ mm}$$ EN 1993-1-3 Kohta 5.5.3.4.3(4-5)

$$s_{eff,n} = 1{,}5s_{eff,0} = 1{,}5 \times 11{,}6 = 17{,}4 \text{ mm}$$

Tehollinen poikkileikkaus (poimun puolikas)

$h_{\text{eff,1}} = s_{\text{eff,1}} \sin\theta = 11{,}6 \times \sin(57{,}1°) = 9{,}74$ mm

$h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin\theta = 17{,}4 \times \sin(57{,}1°) = 14{,}61$ mm

$e_{\text{eff},i}$ [mm]	$A_{\text{eff},i}$ [mm^2]	$I_{\text{eff},i}$ [mm^4]
0	$0{,}5 b_{\text{eff,u}} t = 6{,}1$	≈ 0
0	$0{,}5 b_{\text{eff,u}}\, \chi_d\, t = 5{,}7$	≈ 0
$0{,}5 h_{\text{su}} = 3$	$h_{\text{su}}\, \chi_d\, t_{\text{su}} = 4{,}7$	$\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}{}^3/12 = 14{,}2$
$h_{\text{su}} = 6$	$0{,}5 b_{\text{su0}}\, \chi_d\, t = 2{,}2$	≈ 0
$0{,}5 h_{\text{eff,1}} = 4{,}9$	$h_{\text{eff,1}} t_{\text{w}} = 7{,}0$	$t_{\text{w}} h_{\text{eff,1}}{}^3/12 = 55{,}0$
$h_0 - 0{,}5(h_0 - e_{\text{c}} + h_{\text{eff},n}) = = 45{,}1$	$(h_0 - e_{\text{c}} + h_{\text{eff},n})\, t_w = = 35{,}5$	$t_{\text{w}} \frac{(h_0 - e_{\text{c}} + h_{\text{eff},n})^3}{12} = = 7308{,}8$
$h_0 = 70$	$0{,}5(b_{l0} - b_{sl})\, t = 11{,}1$	≈ 0
$h_0 - 0{,}5 h_{\text{sl}} = 67$	$h_{\text{sl}} t_{\text{sl}} = 5{,}1$	$t_{\text{sl}} h_{\text{sl}}{}^3/12 = 15{,}3$
$h_0 - h_{\text{sl}} = 64$	$0{,}5 b_{\text{sl0}} t = 2{,}4$	≈ 0

$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff,i}} = 79{,}8$ mm^2

$e_{\text{c}} = \frac{\sum A_{\text{eff,i}}\, e_{\text{eff,i}}}{A_{\text{tot}}} = 36{,}8$ mm

$I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff,i}} + \sum A_{\text{eff,i}} (e_{\text{c}} - \text{e}_{\text{eff,i}})^2 = 7\,393{,}3 + 51\,667{,}2 = 59\,060{,}5$ mm^2

Vaihtoehtoisesti tehollinen poikkileikkaus voidaan laskea tarkemmin iteroimalla tehollisen poikkileikkauksen painopisteen sijainti. — EN 1993-1-3

Taivutuskestävyys metriä kohti — Kohta 5.7.4

$I = \frac{1000}{0{,}5 \text{w}_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0{,}5 \times 212{,}5} \times 59\,060{,}5 = 555\,863{,}5$ mm^4

$W_{\text{u}} = \frac{I}{e_{\text{c}}} = \frac{555\,863{,}5}{36{,}8} = 15\,105{,}0$ mm^3

$W_{\text{l}} = \frac{I}{h_0 - e_{\text{c}}} = \frac{555\,863{,}5}{70 - 36{,}8} = 16\,742{,}9$ mm^3

koska $W_{\text{u}} < W_{\text{l}} \Rightarrow W_{\text{eff,min}} = W_{\text{u}} = 15\,105{,}0$ mm^3

$M_{\text{c,Rd}} = \frac{W_{\text{eff,min}} f_{\text{y}}}{\gamma_{\text{M0}}} = 15\,105{,}0 \times 280 \times \frac{10^{-6}}{1{,}1} = 3{,}84$ kNm — Kaava 5.31

Kestävyysvälituella — Kohta 6.4.4

Uuman lommahdus

$c \geq 40$ mm

$r/t = 2/0{,}6 = 3{,}33 \leq 10$ — EN 1993-1-3

$h_{\text{w}}/t = 70/0{,}6 = 117 \leq 200 \sin\theta = 200 \sin(57{,}1°) = 168$ — Kohta 6.1.7

$45° \leq \theta = 57{,}1° \leq 90°$

$\beta_V = 0 \leq 0{,}2 \Rightarrow l_a = s_s = 100$ mm

$\alpha = 0{,}15$ (Luokka 2)

$$R_{w,Rd} = \alpha\, t^2 \sqrt{f_y E}\left(1 - 0{,}1\sqrt{\frac{r}{t}}\right)\left(0{,}5 + \sqrt{0{,}02\frac{l_a}{t}}\right)\left[2{,}4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right]\frac{1}{\gamma_{M1}}\ \frac{1000}{0{,}5 w_0}$$

EN 1993-1-3 Kaava 6.18

$$R_{w,Rd} = 0{,}15 \times 0{,}6^2\sqrt{280 \times 200\,000} \times \left(1 - 0{,}1\sqrt{\frac{2}{0{,}6}}\right)\left(0{,}5 + \sqrt{0{,}02 \times \frac{100}{0{,}6}}\right)$$

$$\times \left[2{,}4 + \left(\frac{57{,}1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1{,}1} \times \frac{1000}{0{,}5 \times 212{,}5} \times 10^{-3} = 18{,}4\,\text{kN}$$

Yhdistetty tukireaktio- ja taivutuskestävyys

Mitoituskuorma murtorajatilassa metriä kohti:

$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1{,}35 \times 0{,}07 + 1{,}5 \times 1{,}4 = 2{,}19$ kN/m

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2{,}19 \times 2{,}9^2}{8} = 2{,}30 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4}qL = \frac{5}{4} \times 2{,}19 \times 2{,}9 = 7{,}94 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{2{,}30}{3{,}84} = 0{,}599 \leq 1{,}0 \qquad \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{7{,}94}{18{,}4} = 0{,}432 \leq 1{,}0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0{,}599 + 0{,}432 = 1{,}031 \leq 1{,}25$$

EN 1993-1-3 Kaava 6.28a - c

Poikkileikkauskestävyys täyttää asetetut ehdot.

Taipumien määrittäminen käyttörajatilassa

Tehollinen poikkileikkaus

Puristettujen taso-osien tehollinen leveys lasketaan käyttörajatilan mukaisen puristusjännityksen perusteella.

Varmalla puolella oleva arvo saadaan edellä murtorajatilan mukaan lasketun W_u -arvon perusteella.

EN 1993-1-3 Kohta 5.5.1

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G+Q)L^2}{8} = \frac{(0{,}07 + 1{,}4) \times 2{,}9^2}{8} = 1{,}55 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{1{,}55 \times 10^6}{15\,105} = 102{,}6 \text{ N/mm}^2$$

Tehollinen poikkileikkaus lasketaan kuten edellä murtorajatilassa paitsi, että f_y -arvo korvataan arvolla $\sigma_{com,Ed,ser}$ ja laippajäykisteen paksuutta ei redusoida. Laskelmien tulokset ovat:

Puristuslaipan tehollinen leveys:	Puristuslaippa on täysin tehollinen
Painopisteakselin sijainti, kun uuma on täysin tehollinen	e_c = 34,48 mm
Puristetun uuman tehollinen leveys	Uuma on täysin tehollinen
Tehollinen poikkileikkaus (poimun puolikas):	Uuma on täysin tehollinen

Tehollinen poikkileikkaus metriä kohti

A_{tot} = 88,41 mm^2
e_c = 34,48 mm
I_{tot} = 63759,0 mm^4
I = 600084,7 mm^4
W_u = 17403,8 mm^4
W_l = 16894,3 mm^4

Taipuman määrittäminen

Sekanttimoduli, joka vastaa taivutusmomentin suurinta arvoa:

$$\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}} = \frac{M_{\mathrm{y,Ed,ser}}}{W_{\mathrm{u}}} = \frac{1{,}55 \times 10^6}{17403{,}8} = 89{,}06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}} = \frac{M_{\mathrm{y,Ed,ser}}}{W_{\mathrm{l}}} = \frac{1{,}55 \times 10^6}{16894{,}3} = 91{,}75 \text{ N/mm}^2$$

$n = 14$ (ferriittisille ruostumattomalle teräslajille 1.4003) — Taul. 6.4

$$E_{\mathrm{S},1} = \frac{E}{1 + 0{,}002 \frac{E}{\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}}}{f_{\mathrm{y}}}\right)^n} = \frac{200}{1 + 0{,}002 \times \frac{200}{0{,}089} \left(\frac{0{,}089}{0{,}28}\right)^{14}} = 200{,}0 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.53

$$E_{\mathrm{S},2} = \frac{E}{1 + 0{,}002 \frac{E}{\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}}}{f_{\mathrm{y}}}\right)^n} = \frac{200}{1 + 0{,}002 \times \frac{200}{0{,}092} \left(\frac{0{,}092}{0{,}28}\right)^{14}} = 200{,}0 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.53

$$E_{\mathrm{S}} = \frac{E_{\mathrm{S},1} + E_{\mathrm{S},2}}{2} = \frac{200 + 200}{2} = 200 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.52

Tarkastelluilla jännitystasoilla materiaali käyttäytyy lineaarisesti eikä siten materiaalin epälineaarisuudella ole vaikutusta taipumiin.

Taipuman tarkistus:

Muotolevyn jäykkyyden laskemiseksi pyöristetyn nurkkasäteen vaikutus otetaan huomioon. Likimääräisesti voidaan laskea seuraavasti:

$$\delta = 0{,}43 \frac{\sum_{\mathrm{j}=1}^{n} r_{\mathrm{j}} \frac{\varphi_j}{90^o}}{\sum_{\mathrm{i}=1}^{m} b_{\mathrm{p,i}}} = 0{,}43 \frac{2 \times \frac{294{,}2^o}{90^o}}{149{,}3} = 0{,}019$$ — Kaava 5.22

$I_{\mathrm{y,r}} = I\,(1 - 2\delta) = 600084{,}7\,(1 - 2 \times 0{,}019) = 577281{,}5 \text{ mm}^4$ — Kaava 5.20

Suurimman taipuman sijainti:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 2{,}9 = 1{,}22 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48 E_{\mathrm{S}}\, I_{\mathrm{y,r}}} \left(\frac{x}{L} - 3\frac{x^3}{L^3} + 2\frac{x^4}{L^4}\right)$$

$$\delta = \frac{(0{,}07 + 1{,}4) \times 10^3 \times 2{,}9^4}{48 \times 200 \times 10^6 \times 577281{,}5 \times 10^{-12}} \times \left(\frac{1{,}48}{2{,}9} - 3 \times \frac{1{,}48^3}{2{,}9^3} + 2 \times \frac{1{,}48^4}{2{,}9^4}\right)$$

$\delta = 4{,}64$ mm

Sallittu taipuma on $L/200$ = 2900/200 = 14,5 mm > 4,64 mm, joten rakenne on hyväksyttävissä.

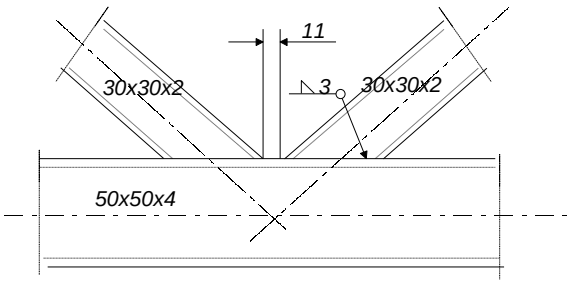
MITOITUSESIMERKKI 4 – RAKENNEPUTKILIITOSTEN VÄSYMISLUJUUS

Tässä esimerkissä käsitellään hitsatun putkiristikon nurkan väsytyskestävyyttä. Väsyminen voi olla määräävä ruostumattomista teräksistä tehdyissä rakenteissa, kun rakenteeseen kohdistuu jännitysvaihteluja. Väsytyskuormitettuja putkien liitoksia voi esiintyä esim. öljynporausrakenteissa, mastoissa, savupiipuissa, silloissa, nostureissa ja kuljetusvälineissä.
EN1993-1-9 soveltuu myös austeniittisista ja duplex ruostumattomista teräksistä tehdyille rakenteille.

Esimerkki sisältää seuraavat tehtävät:

- väsytyskäyrän määrittäminen
- liitoksen sekundaaristen taivutusmomenttien määrittäminen
- osavarmuusluvun määrittäminen väsytyslaskelmia varten ja
- Väsymiskestävyyden määrittäminen annetulle vaihtuvalle kuormalle.

Paarteena rakenneputki 50x50x4 ja uumasauvoina rakenneputki 30x30x2. Materiaalina on ruostumaton teräs 1.4301, jonka 0,2-raja on 210 N/mm^2. Taul. 2.2



Kuormitukset

Väsyttävän jännitysspektrin määrittäminen paarteelle vaadittuna käyttöaikana:

Nimellinen jännitysvaihtelu:	Jännitysvaihteluiden lukumäärä:
$\Delta\sigma_1$ = 100 N/mm^2	$n_1 = 10\times10^3$
$\Delta\sigma_2$ = 70 N/mm^2	$n_2 = 100\times10^3$
$\Delta\sigma_3$ = 40 N/mm^2	$n_3 = 1000\times10^3$

Rakenneanalyysi

Liitoksen väsytysluokka riippuu paarteen ja uumasauvojen mitoista. Tässä esimerkissä b_0 = 50 mm, b_i = 30 mm, t_0 = 4 mm and t_i = 2 mm. Viittaukset alla tarkoittavat EN 1993-1-9

Koska t_0/t_i = 2, väsytysluokka on 71.

Koska 0,5(b_0 - b_i) = 10 mm, g = 11 mm, 1,1(b_0 - b_i) = 22 mm ja 2t_0 = 8 mm, liitos täyttää myös ehdot 0,5(b_0 - b_i) ≤ g ≤ 1,1(b_0 - b_i) ja g ≥ 2t_0. Taul. 8.7

Liitoksen sekundaaristen taivutusmomenttien vaikutus

Sekundaaristen taivutusmomenttien vaikutus otetaan huomioon kertomalla aksiaalisista voimista aiheutuva jännitysvaihtelu kertoimella k_1 = 1,5. — Kohta 4 (2), Taul. 4.2

Osavarmuusluvut

Olettamalla, että rakenne on viansietävä (damage tolerant) ja vaurion seuraukset ovat vähäiset, suositeltava osavarmuusluku γ_{Mf} = 1,0. — Kohta 3 (7), Taul. 3.1

Kuorman osavarmuusluku on is γ_{Ff} = 1,0.

Väsymiskestävyyden laskenta

Kuormanvaihtolukua 2×10^6 vastaava väsytysluokan 71 viitearvo on $\Delta\sigma_c$ = 71 N/mm^2. — Kuva 7.1

Tasoristikon väsytyskäyrän kaltevuus (vakio) on m = 5.

Nimellistä jännitysvaihtelua $\Delta\sigma_i$ vastaava jännitysvaihteluiden lukumäärä on:

$$N_i = 2\times10^6\left[\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}\gamma_{Ff}\left(k_1\Delta\sigma_i\right)}\right]^m$$

$\Delta\sigma_1$ = 100 N/mm^2	$N_1 = 47{,}5\times10^3$
$\Delta\sigma_2$ = 70 N/mm^2	$N_2 = 283\times10^3$
$\Delta\sigma_3$ = 40 N/mm^2	$N_3 = 4640\times10^3$

Kumulatiivinen vaurio Palmgren-Miner:n säännön mukaan

$\Delta\sigma_i$:n suuruisten jännitysvaihtelujen, joiden lukumäärä on n_i , osittainen vaurio on:

$D_{d,i} = n_i / N_i$

Saadaan siis

$\Delta\sigma_1$ = 100 N/mm^2	$D_{d,1}$ = 0,21	A.5 (1)
$\Delta\sigma_2$ = 70 N/mm^2	$D_{d,2}$ = 0,35	
$\Delta\sigma_3$ = 40 N/mm^2	$D_{d,3}$ = 0,22	

Kumulatiivinen vaurio suunniteltuna käyttöaikana on: — Kaava A.1

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = \sum D_{d,i} = 0{,}78 \le 1{,}0$$

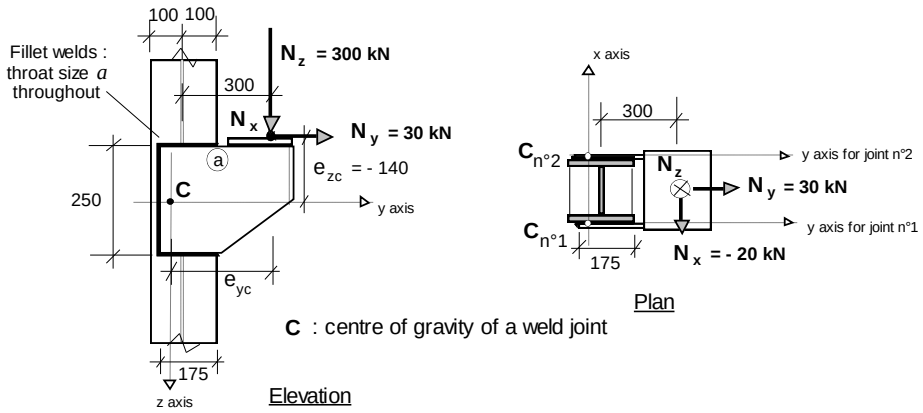
Koska kumulatiivinen vaurio on pienempi kuin yksi, paarteen laskettu käyttöikä on suurempi kuin vaadittu käyttöikä — Kohta 8 (4)

Edellä kuvattu laskelma tulee tehdä myös uumasauvoille.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	Title	Mitoitusesimerkki 5 – Hitsattu liitos		
CALCULATION SHEET	Client	Research Fund for Coal and Steel	Made by IR	Date 08/02
			Revised by MEB	Date 04/06
			Revised by UDE	Date 01/17

MITOITUSESIMERKKI 5 – HITSATTU LIITOS

Liitos ja kuormitus esitetään alla olevassa kuvassa. Pienahitsit ovat kahdessa tasossa ja tasot ovat identtisiä. Pienahitsit ovat yhtä suuria ja tehtävänä on määrittää tarvittava a-mitta. Pienahitsit ovat samankokoisia molemmissa tasoissa ja pienahitsit ovat tasakylkisiä.



Materiaaliominaisuudet

Teräslaji 1.4401:

f_y = 220 N/mm^2, f_u = 530 N/mm^2, E = 200000 N/mm^2 and G = 76900 N/mm^2. Taul. 2.2

Oletetaan, että hitsin myötöraja ja murtolujuus ovat suuremmat kuin perusaineen vastaavat arvot. Kohta 2.3.1 Kohta 7.4.1

Osavarmuusluvut

Hitsin kestävyyttä laskettaessa osavarmuusluku on γ_{M2} = 1,25.

Esimerkissä tarkastetaan myös hitsin pituuden vaikutus sen kestävyyteen. Taul. 4.1

Rakenneanalyysi

Tässä esimerkissä käytetään kimmoteorian mukaista analyysia, joka johtaa varmalla puolella olevaan tulokseen. EN 1993-1-8 Kohta 2.5

Hitsausliitoksen eri pisteiden koordinaatit (x_c , y_c , z_c) perustuvat oikean käden mukaiseen järjestelmään siten, että origo on hitsausliitoksen painopisteessä. (Tässä esimerkissä itse liitos on y-z -tasossa, joten x_c = 0.)

Kimmoteorian mukaisen analyysin päätarkoitus on määrittää hitseissä vaikuttavat voimat eniten rasitetussa pisteessä tai pisteissä, joita kutsutaan “kriittisiksi” pisteiksi.
Tarkasteltavalle liitokselle voidaan olettaa, että kriittinen piste sijaitsee kohdassa, joka on kauimpana liitoksen painopisteestä.

Vaikuttava voima, sen epäkeskeisyys, vaikuttavat momentit ja painopiste C voidaan esittää vektoreina seuraavasti:

<u>Vaikuttava voima</u>

$$\overline{N_{\mathrm{w,Ed}}} = \left[N_{\mathrm{x,Ed}},\quad N_{\mathrm{y,Ed}},\quad N_{\mathrm{z,Ed}} \right]$$

Vaikuttavan voiman epäkeskeisyys:

$$\overline{e_{\mathrm{N}}} = \left[e_{\mathrm{xc}}, \quad e_{\mathrm{yc}}, \quad e_{\mathrm{zc}} \right]$$

joka tarkoittaa vaikuttavan voimavektorin $\overline{N_{\mathrm{w,Sd}}}$ koordinaatteja.

Vaikuttavat momentit

$$M_{\mathrm{xc,Ed}} = e_{\mathrm{yc}} N_{\mathrm{z,Ed}} - e_{\mathrm{zc}} N_{\mathrm{y,Ed}}$$
$$M_{\mathrm{yc,Ed}} = e_{\mathrm{zc}} N_{\mathrm{x,Ed}} - e_{\mathrm{xc}} N_{\mathrm{z,Ed}}$$
$$M_{\mathrm{zc,Ed}} = e_{\mathrm{xc}} N_{\mathrm{y,Ed}} - e_{\mathrm{yc}} N_{\mathrm{x,Ed}}$$

Liitoksen kimmoteorian mukainen analyysi yleiselle kuormitustapaukselle johtaa seuraaviin voimakomponentteihin hitsin pituusyksikköä kohti pisteessä (x_c, y_c, z_c). Hitsin a-mitta on a:

$$F_{\mathrm{wx,Ed}} = a \left[\frac{N_{\mathrm{x,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}} + \frac{z_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{yc,Ed}}}{I_{\mathrm{yc}}} - \frac{y_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{zc,Ed}}}{I_{\mathrm{zc}}} \right]$$

$$F_{\mathrm{wy,Ed}} = a \left[\frac{N_{\mathrm{y,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}} + \frac{x_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{zc,Ed}}}{I_{\mathrm{zc}}} - \frac{z_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{xc,Ed}}}{I_{\mathrm{xc}}} \right]$$

$$F_{\mathrm{wz,Ed}} = a \left[\frac{N_{\mathrm{z,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}} + \frac{y_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{xc,Ed}}}{I_{\mathrm{xc}}} - \frac{x_{\mathrm{c}} M_{\mathrm{yc,Ed}}}{I_{\mathrm{yc}}} \right]$$

Yllä olevissa lausekkeissa hitsin pinta-ala ja hitausmomentit liitoksen pääjäyhyysakselien suhteen lasketaan kaavoista:

$$A_{\mathrm{w}} = \int a dl = \sum a_{\mathrm{i}} l_{\mathrm{i}}$$

suoralle hitsille, jonka pituus on l_i ja a-mitta on a_i,

$$I_{\mathrm{xc}} = \int a \left(y_{\mathrm{c}}^2 + z_{\mathrm{c}}^2 \right) dl$$
$$I_{\mathrm{yc}} = \int a \left(x_{\mathrm{c}}^2 + z_{\mathrm{c}}^2 \right) dl$$
$$I_{\mathrm{zc}} = \int a \left(x_{\mathrm{c}}^2 + y_{\mathrm{c}}^2 \right) dl$$

Koska a-mitta, a, on valio, saadaan:

$$\frac{A_{\mathrm{w}}}{a} = \int dl = \sum l_{\mathrm{i}}$$

koska $x_c = 0$, saadaan:

$$\frac{I_{\mathrm{zc}}}{a} = \int y_{\mathrm{c}}^2 dl$$
$$\frac{I_{\mathrm{yc}}}{a} = \int z_{\mathrm{c}}^2 dl$$
$$\frac{I_{\mathrm{xc}}}{a} = \int y_{\mathrm{c}}^2 + z_{\mathrm{c}}^2 dl = \frac{I_{\mathrm{yc}}}{a} + \frac{I_{\mathrm{zc}}}{a}$$

Pienahitsin mitoitus

Pienahitsien mitoittamiseksi on kaksi menetelmää ja niitä käytetään määritettäessä hitsin tarvittava a-mitta kriittisessä pisteessä and

Kohta 7.4.2

Ensimmäinen, yksinkertaistettu, varmalla puolella oleva menetelmä perustuu pienahitsin leikkauslujuuteen. Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo määritetään yksikköpituutta kohti vaikuttavan voiman vektoriarvosta ottaen huomioon vaikuttavat epäkeskeisyydet. Tämän voiman mitoitusarvo pituusyksikköä kohti ei saa ylittää vastaavaa pienahitsin pituusyksikköä kohti laskettua leikkauskestävyyden mitoitusarvoa. Tässä menetelmässä ei oteta huomioon vaikuttavan voiman suuntaa suhteessa hitsin mitoituspinta-alaan.

Toisessa menetelmässä verrataan suurinta vaikuttavaa mitoitusjännitystä, joka lasketaan von Mises:n jännityksestä, heikoimman liitettävän osan lujuuteen. Tämä menetelmä on tarkempi ja siinä otetaan huomioon vaikuttavan mitoitusvoiman suunta suhteessa hitsin mitoituspinta-alaan.

1. Yksinkertaistettu menetelmä

Pienahitsin mitoitusehto on

$$F_{\mathrm{w.Ed}} = \sqrt{F_{\mathrm{wx,Ed}}^2 + F_{\mathrm{wy,Ed}}^2 + F_{\mathrm{wz,Ed}}^2} \le F_{\mathrm{w,Rd}} = a f_{\mathrm{vw,d}} = a\left(\frac{f_{\mathrm{u}}/\sqrt{3}}{\beta_{\mathrm{w}}\gamma_{\mathrm{M2}}}\right)$$

EN 1993-1-8 Kohta 4.5.3.3

missä:
$f_{\mathrm{vw,d}}$ on hitsin leikkauslujuus,
$F_{\mathrm{w,Rd}}$ on hitsin leikkauskestävyyden mitoitusarvo yksikköpituutta kohta ja hitsin a-mitta on a..

Ruostumattomille teräksille käytetään β_{w} = 1,0.

Kohta 7.4.2

Tarvittava a-mitta saadaan siis kaavasta:

$$a \ge \frac{F_{\mathrm{w,Ed}}}{f_{\mathrm{vw,d}}}$$

2. Komponenttimenetelmä

Komponenttimenetelmässä hitsin välittämä voima jaetaan normaalijännityskomponenttin ja leikkausjännityskomponenttiin (kts. kuva. 4.5 in EN 1993-1-8):

- Normaalijännitys $\sigma_{\perp}$ kohtisuoraan hitsin a-mittaa,
- Leikkausjännitys $\tau_{||}$, joka vaikuttaa hitsin pituusakselin suuntaisesti,
- Leikkausjännitys $\tau_{\perp}$,joka vaikuttaa kohtisuoraan hitsin akseliin nähden.

Normaalijännitystä $\sigma_{||}$ hitsin akselin suuntaisesti ei oteta huomioon.

Mitoitusehdot ovat:

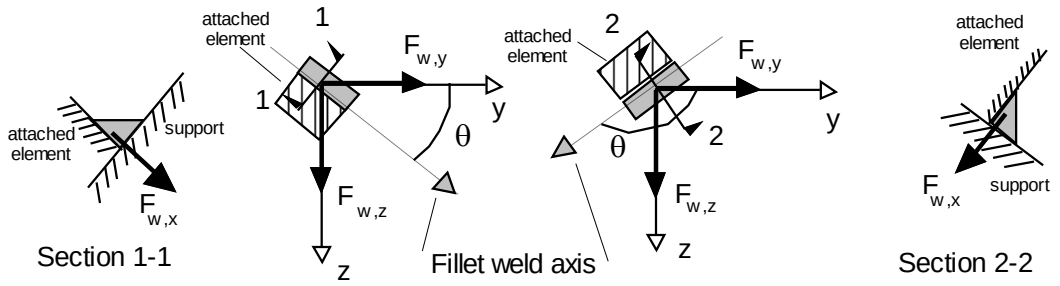
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} \le \frac{f_{\mathrm{u}}}{\beta_{\mathrm{w}}\gamma_{\mathrm{M2}}} \quad \text{and} \quad \sigma_{\perp} \le \frac{0{,}9 f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Kaavat. 7.14 ja 7.15

Tarkasteltavalle tapaukselle, jossa pienahitsit (pienan kyljet yhtä suuria) ovat suorassa kulmassa toisiinsa nähden, jälkimmäinen ehto ei ole määräävä. Jälkimmäinen ehto voi olla määräävä esim. osittain läpihitsatuissa pienahitseissä viistettä käytettäessä.

Huom.: Alaindeksit on lyhennetty seuraavasti: $F_{\mathrm{w,x}}$ vastaten arvoa $F_{\mathrm{wx,Sd}}$ jne.

Yllä olevassa lausekkeessa kulma θ on y-akselin ja hitsin akselin välinen kulma alla olevan kuvan mukaan.



Hitsin kriittisen pisteen voimakomponentit esitetään tämän esimerkin liitteessä.

1. Mitoitus käyttäen yksinkertaistettua, leikkauslujuuteen perustuvaa menettelyä

Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo yksinkertaistetussa menetelmässä on:

$$f_{\mathrm{vw,d}} = \frac{f_{\mathrm{u}}}{\beta_{\mathrm{w}}\gamma_{\mathrm{M2}}\sqrt{3}} = \frac{530}{1{,}0\times 1{,}25\times\sqrt{3}} \approx 245 \text{ N/mm}^2$$

EN 1993-1-8: Kaava 4.4

Resultoivan voiman mitoitusarvo hitsin pituusyksikköä ja 1 mm:n hitsin paksuutta kohti on:

$$F_{\mathrm{w,Ed}} = \sqrt{F_{\mathrm{wx,Ed}}^2 + F_{\mathrm{wy,Ed}}^2 + F_{\mathrm{wz,Ed}}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ N/mm}$$

Vaadittavaksi a-mitaksi saadaan siten:

$$a \geq \frac{F_{\mathrm{w,Ed}}}{f_{\mathrm{vw,d}}} = \frac{1245}{245} \approx 5{,}0 \text{ mm}$$

2. Hitsin mitoitus käyttäen komponenttimenetelmää

Pisteessä (a), missä kulma $\theta = 0$, mitoitusehdoksi saadaan:

$$2F_{\mathrm{wx,Ed}}^2 + 3F_{\mathrm{wy,Ed}}^2 + 2F_{\mathrm{wz,Ed}}^2 + 2F_{\mathrm{wx,Ed}}F_{\mathrm{wz,Ed}} \leq \left(a\frac{f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}\right)^2$$

Vaadittavaksi a-mitaksi saadaan siten:

$$a \geq \frac{\sqrt{2\times(-243)^2 + 3\times(747)^2 + 2\times(966)^2 + 2\times(-243)\times(966)}}{530/1{,}25} = 4{,}8 \text{ mm}$$

Valitaan a-mitaksi 5 mm kaikkiin hitseihin ja hitsin hitsataan koko pituudelta.

<u>*Huom.:*</u> Jos hitsin tehollinen pituus on suurempi kuin 150*a* hitsin kestävyyttä tulee pienentää. Hitsin koko pituudelle ja 5 mm:n a-mitalle saadaan*:*

$$\beta_{\mathrm{LW.1}} = 1{,}2 - \frac{0{,}2L_{\mathrm{j}}}{150a} = 1{,}2 - \frac{0{,}2\times 600}{150\times 5} = 1{,}04 > 1{,}0$$

EN 1993-1-8 Kaava. 4.9

Saadaan $\beta_{\mathrm{LW.1}} = 1{,}0$.

Todetaan, että hitsin kestävyyttä ei tarvitse pienentää hitsin pituuden takia.

Liite – Hitsin kriittisen pisteen voimakomponenttien laskenta

Liitoksen geometriset ominaisuudet

Liitoksessa on kaksi samanlaista kiinnitystä, yksi pilarin kummallakin puolen, jotka siirtävät voimia. Tarkastellaan vain toista puolta.

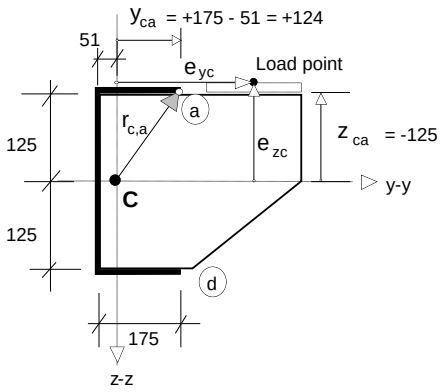
Hitsin pinta-ala, hitsin painopisteen sijainti ja kriittinen piste.

Hitsin pinta-ala liitoksessa koostuu suorista osista, joiden pituus on L_i ja a-mitta on vakio, jolloin 1 mm kohti saadaan:

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a\int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum aL_{w,i}}{a} = \sum L_i = 2\times 175 + 250 = 600 \text{ mm}^2\text{/m}$$

Kun a-mitta on vakio, hitsin painopisteen etäisyydeksi hitsin pystylinjasta (z- akselin suuntainen) saadaan

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i \frac{A_{w,i}}{a}}{\sum \frac{A_{w,i}}{a}} = \frac{\sum \bar{y}_i L_i}{\sum L_i} = \frac{2\times(87{,}5\times 175) + 0\times 250}{600} \approx 51 \text{ mm}$$



Liitoksen kriittisen pisteen koordinaateiksi (piste a) saadaan hitsin painopisteestä C lukien:

$$y_{ca} = +(175-51) = +124\text{mm} \qquad z_{ca} = -125\text{mm}$$

Huom.: Myös piste (d) voitaisiin valita kriittiseksi pisteeksi, jolle saadaan:

$$y_{ca} = +(175-51) = +124\text{mm} \qquad z_{ca} = +125\text{mm}$$

Tarkasteltavalle kuormitustapaukselle piste (a) on kriittisin.

Liitoksen hitausmomentit 1 mm hitsin paksuutta kohden saadaan:

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2\times 175\times 125^2 + \frac{250^3}{12} = 6{,}77\times 10^6 \text{ mm}^4\text{/mm}$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250\times 51^2 + 2\times\frac{175^3}{12} + 2\times 175\times(87{,}5-51)^2 = 2{,}01\times 10^6 \text{ mm}^4\text{/mm}$$

Hitausmomentti "väännön" suhteen liitosta kohti on:

$$I_{xc} = a\int r_c^2 ds = a\int y_c^2 ds + a\int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc}$$

siten:

$$\frac{I_{xc}}{a} = (6{,}77 + 2{,}01)\times 10^6 = 8{,}78\times 10^6 \text{mm}^4\text{/mm}$$

Vaikuttavat voimat ja momentit:

Oletetaan, että vaikuttavat voimat ja momentit jakaantuvat tasan liitoksen molemmille puolille. Vaikuttavat aksiaalinen ja leikkausvoima liitosta kohti ovat:

$$N_{\mathrm{x,Ed}} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ kN} \qquad N_{\mathrm{y,Ed}} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ kN} \qquad N_{\mathrm{z,Ed}} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ kN}$$

Vaikuttavat momentit lasketaan vaikuttavien voimien ja niiden epäkeskeisyyksien perusteella. Epäkeskeisyydet, ts. voimien sijainnit suhteessa hitsin painopisteeseen, ovat:

$e_{\mathrm{xc}} = 0$ koska voima vaikuttaa liitoksen y-z-tasossa

$e_{\mathrm{yc}} = 300 - 100 + 175 - 51 = +\ 324$ mm

$e_{\mathrm{zc}} = -\ 140$ mm

Momenteiksi liitosta kohti saadaan:

$$M_{\mathrm{xc,Ed}} = e_{\mathrm{yc}} N_{\mathrm{z,Ed}} - e_{\mathrm{zc}} N_{\mathrm{y,Ed}} = (+324)\times(+150) - (-140)\times(+15) = +50,7 \text{ kNm}$$

$$M_{\mathrm{yc,Ed}} = e_{\mathrm{zc}} N_{\mathrm{x,Ed}} - e_{\mathrm{xc}} N_{\mathrm{z,Ed}} = (-140)\times(-10) - (0)\times(+150) = +1,4 \text{ kNm}$$

$$M_{\mathrm{zc,Ed}} = e_{\mathrm{xc}} N_{\mathrm{y,Ed}} - e_{\mathrm{yc}} N_{\mathrm{x,Ed}} = (0)\times(+15) - (+324)\times(-10) = +3,24 \text{ kNm}$$

Hitsin kriittisessä pisteessä vaikuttavat voimat

y-z-tasossa hitsin yksikköpituutta kohti lasketut voimat pisteessä (a) ovat:

$$F_{\mathrm{wx,Ed}} = \frac{N_{\mathrm{x,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} + \frac{z_{\mathrm{ca}} M_{\mathrm{yc,Ed}}}{I_{\mathrm{yc}}/a} - \frac{y_{\mathrm{ca}} M_{\mathrm{zc,Ed}}}{I_{\mathrm{zc}}/a}$$

$$F_{\mathrm{wy,Ed}} = \frac{N_{\mathrm{y,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} - \frac{z_{\mathrm{ca}} M_{\mathrm{xc,Ed}}}{I_{\mathrm{xc}}/a}$$

$$F_{\mathrm{wz,Ed}} = \frac{N_{\mathrm{zc,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} / \frac{y_{\mathrm{ca}} M_{\mathrm{xc,Ed}}}{I_{\mathrm{xc}}/a}$$

Ulkoisista voimista aiheutuvat hitseihin vaikuttavat voimakomponentit (kaikissa hitsin pisteissä) ovat

$$F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{N_x}} = \frac{N_{\mathrm{x,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} = \frac{-10}{600} = -17 \text{ N/mm}$$

$$F_{\mathrm{w,y}}^{\mathrm{N_y}} = \frac{N_{\mathrm{y,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} = \frac{+15}{600} = +25 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{\mathrm{z,Ed}}}{A_{\mathrm{w}}/a} = \frac{+150}{600} = +\ 250 \text{ N/mm}$$

Ulkoisista momenteista aiheutuvat hitseihin vaikuttavat voimakomponentit yksikköpituutta kohti pisteessä (a) ovat:

$$F_{\mathrm{w,y}}^{\mathrm{M_{xc}}} = -M_{\mathrm{xc,Ed}} \frac{z_{\mathrm{c,a}}}{I_{\mathrm{xc}}/a} = -50,7\times10^6 \times \frac{(-125)}{8,78\times10^6} = +722 \text{ N/mm}$$

$$F_{\mathrm{w,z}}^{\mathrm{M_{xc}}} = +M_{\mathrm{xc,Ed}} \frac{y_{\mathrm{c,a}}}{I_{\mathrm{xc}}/a} = +50,7\times10^6 \times \frac{(+124)}{8,78\times10^6} = +716 \text{ N/mm}$$

$$F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{M_{yc}}} = +M_{\mathrm{yc,Ed}} \frac{z_{\mathrm{c,a}}}{I_{\mathrm{yc}}/a} = +1,41\times10^6 \times \frac{(-125)}{6,77\times10^6} = -26 \text{ N/mm}$$

$$F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{M_{zc}}} = -M_{\mathrm{zc,Ed}} \frac{y_{\mathrm{c,a}}}{I_{\mathrm{zc}}/a} = -\ 3,24\times10^6 \times \frac{(+124)}{2,01\times10^6} = -\ 200 \text{ N/mm}$$

Yhdistämällä ulkoisista voimista ja momenteista aiheutuvat komponentit pisteessä (a) saadaan:

$$F_{\mathrm{wx,Ed}} = F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{N_x}} + F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{M_{yc}}} + F_{\mathrm{w,x}}^{\mathrm{M_{zc}}} = -17 - 26 - 200 = -243 \text{ N/mm}$$

$$F_{\mathrm{wy,Ed}} = F_{\mathrm{w,y}}^{\mathrm{N_y}} + F_{\mathrm{w,y}}^{\mathrm{M_{xc}}} = +25 + 722 = +747 \text{ N/mm}$$

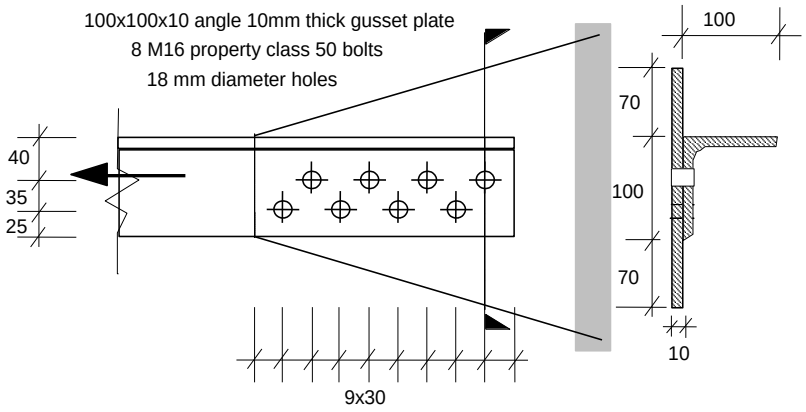
$$F_{\mathrm{wz,Ed}} = F_{\mathrm{w,z}}^{\mathrm{N_z}} + F_{\mathrm{w,z}}^{\mathrm{M_{xc}}} = +250 + 716 = +966 \text{ N/mm}$$

Nämä resultoivat voimakomponentit on laskettu hitsin yksikköpituutta kohti ja 1 mm:n a-mittaa kohti.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	Title	Mitoitusesimerkki 6 – Ruuviliitos		
CALCULATION SHEET	Client	Research Fund for Coal and Steel	Made by IR	Date 10/02
			Revised by MEB	Date 04/06
			Revised by UDE	Date 01/17

MITOITUSESIMERKKI 6 – RUUVILIITOS

Vedetty kulmateräs 100×100×10 kiinnitetään 10 mm paksuun levyyn. Kulmateräksen ja levyn materiaali on ruostumaton teräs 1.4401. Käytetään kahdeksaa 16 mm ruuvia, joiden lujuusluokka on 50 ja jotka sijoitetaan ao. kuvan mukaan. Tehtävänä on määrittää liitoksen kestävyyden mitoitusarvo.



Kiinnitys: Kiinnitysluokka A reunapuristustyyppinen kiinnitys. — EN 1993-1-8
Leikkausvoiman mitoitusarvo ei saa ylittää leikkauskestävyyden mitoitusarvoa eikä leikkauslommahduskestävyyden mitoitusarvoa. — Kohta 3.4.1

Materiaaliominaisuudet

Kulmateräksen ja levyn materiaali on ruostumaton teräs 1.4401: — Taul. 2.2

f_y = 220 N/mm^2 ja f_u = 530 N/mm^2 — Kohta 2.3.1

Ruuvien ominaisuusluokka on 50.

f_{yb} = 210 N/mm^2 ja f_{ub} = 500 N/mm^2. — Taul. 2.6

Osavarmuusluvut

Bruttopoikkileikkauksen kestävyys: $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1{,}1$ — Taul. 4.1

Nettopoikkileikkauksen kestävyys: $\gamma_{M2} = 1{,}25$

Ruuvin leikkaus- ja reunapuristuskestävyys: $\gamma_{M2} = 1{,}25$

Reikien sijainti ja koko — Kohta 7.2.3

Ruuville M16 käytetään reiän halkaisijaa d_0 = 18 mm.

Päätyetäisyydet e_1 = 30 mm reunaetäisyys e_2 = 25 mm.

e_1 ja e_2 $< 4t + 40 = 4 \times 10 + 40 = 80$ mm ja
$> 1{,}2d_0 = 1{,}2 \times 18 = 21{,}6$ mm

Limitetyt ruuvirivit:

- keskietäisyys p_1 = 60 mm > 2,2d_0 = 39,6 mm
- eri rivissä olevien ruuvien välinen etäisyys:

$$\sqrt{30^2 + 35^2} = 46{,}1 \text{ mm} > 2{,}4\text{d}_0 = 43{,}2 \text{ mm}$$

- limitettyjen ruuvirivien välinen etäisyys p_2 = 35 mm > 1,2d_0 = 21,6 mm

<u>Huom.</u>: Levyjen paikallinen lommahdus tarkistetaan kiinnittimien välisellä alueella (mitat e_2 ja p_1). Tarkistus tehdään sekä ulokkeelliselle osalle että kiinnittimien väliselle osalle. Sekä kulmateräksen että levyn paikallinen lommahdus tarkastetaan.

Kulmateräksen bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo — Kohta 7.2.3

Kulmateräksen bruttopoikkileikkauksen pinta-ala A_g = 1915 mm²

Vetokestävyyden mitoitusarvo:

$$N_{\text{pl,Rd}} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1915 \times 220}{1{,}1 \times 10^3} = 383 \text{ kN}$$ — Kaava 7.6

Kulmateräksen nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo

Limitetyille rei'ille nettopoikkileikkauksen pinta-ala on pienempi joko bruttopoikkipinta-ala vähennettynä rivissä olevien Reikien pinta-aloilla tai: — Kohta 5.6.4

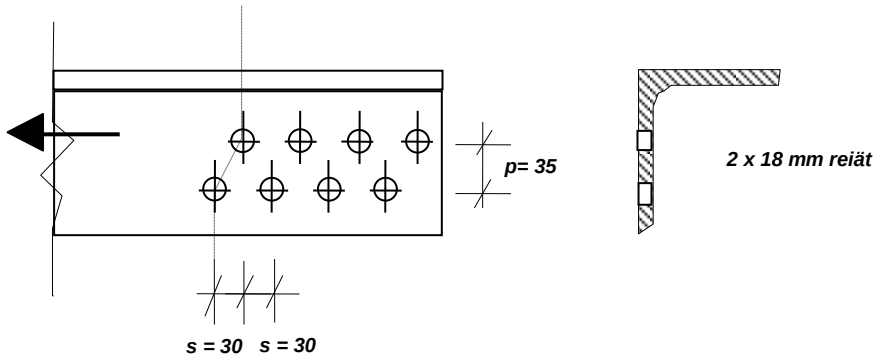
$$A_g - t\left(nd_0 - \sum\left[\frac{s^2}{4p}\right]\right)$$

Rivissä olevien reikien vähennys:

$$A_g - td_0 = 1915 - 10 \times 18 = 1735 \text{ mm}^2$$

Nettopoikkileikkaus kahden limitetyn reiän kautta:

n = 2, s = 30 mm ja p = 35 mm



$$A_{\text{net}} = A_g - t\left(nd_0 - \sum\frac{s^2}{4p}\right) = 1915 - 10 \times \left((2 \times 18) - \frac{30^2}{4 \times 35}\right)$$
$$= 1915 - 10 \times (36 - 6{,}4) = 1619 \text{ mm}^2$$

Saadaan, A_{net} = 1619 mm².

Pienennystekijä, kun kulmateräs kiinnitetään yhdestä laipasta useammalla kuin kolmella ruuvilla: β_3 = 0,57. — Taul. 7.1

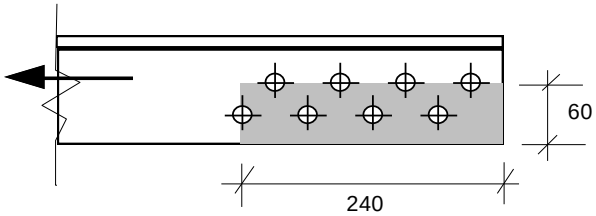
Kulmateräksen nettoleikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo: — Kohta 7.2.3

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{\beta_3 A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} = \frac{0{,}57 \times 1619 \times 530}{1{,}25 \times 10^3} = 391 \text{ kN}$$

Kaava 7.10

Kulmateräksen palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo

Mitoitus tehdään prEN 1993-1-8 (eikä ENV 1993-1-1) mukaan, koska prEN 1993-1-8 koskee eksplisiittisesti myös kulmateräksiä



Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun kaksi ruuviriviä on limitetty:

$$V_{\mathrm{eff,2,Rd}} = \frac{0{,}5 f_{\mathrm{u}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} + \frac{f_{\mathrm{y}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{0{,}5 \times 530 \times (60-18) \times 10}{1{,}25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18) \times 10}{\sqrt{3} \times 1{,}1 \times 10^3}$$
$$= 89 + 194 = 283 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8 Kohta 3.10.2(3) Kaava 3.10

Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun kaksi ruuviriviä eivät ole limitettyjä:

$$V_{\mathrm{eff,2,Rd}} = \frac{0{,}5 f_{\mathrm{u}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} + \frac{f_{\mathrm{y}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{0{,}5 \times 530 \times (60-18-9) \times 10}{1{,}25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1{,}1 \times 10^3}$$
$$= 70 + 204 = 274 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8 Kohta 3.10.2(3) Kaava 3.10

Kiinnityslevyn vetokestävyyden mitoitusarvo nettoleikkauksessa

Kiinnityslevyn bruttopoikkileikkauksen pinta-ala kulmateräksen viimeisen ruuvin reiän kohdalla: — Kohta 5.7.2

$A_{\mathrm{g}} = 10 \times (100 + 70 + 70) = 2400 \text{ mm}^2$

Kiinnityslevyn vetokestävyyden mitoitusarvoksi ko. leikkauksessa saadaan:

$$N_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{2400 \times 220}{1{,}1 \times 10^3} = 480 \text{ kN}$$

Kaava 5.23

Kiinnityslevyn bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo

Kiinnityslevyn nettopoikkileikkauksen pinta-ala kulmateräksen viimeisen ruuvin reiän kohdalla, missä kuorma on suurimmillaan. Nettopinta-ala kulkee yhden epäsymmetrisesti sijaitsevan reiän kautta: — Kohta 5.7.2

$b = 100 + 70 + 70 = 240$ mm

$A_{\mathrm{net}} = A_{\mathrm{g}} - d_0 t = 2400 - 18 \times 10 = 2220 \text{ mm}^2$

Kiinnityslevyn nettopoikkileikkauksen pinta-ala kulmateräksen kahden limitetyn ruuvin reiän kohdalla, kun s = 30 mm ja p = 30 mm:

$$A_{\mathrm{net}} = A_{\mathrm{g}} - 2 d_0 t + \frac{s^2 t}{4p} = 2400 - 2 \times 18 \times 10 + \frac{30^2 \times 10}{4 \times 35}$$
$$= 2400 - 360 + 64 = 2104 \text{ mm}^2$$

Saadaan, A_{net} = 2104 mm².

Kiinnityslevyn nettoleikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo kulmateräksen pään läheisyydessä:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{kA_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$ Kaava 5.24

Käyttämällä k = 1,0 tässä esimerkissä (k = 1,0 rei'ille, joilla on sileä pinta)

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{1{,}0 \times 2104 \times 530}{1{,}25 \times 10^3} = 892 \text{ kN}$$

Suositeltavaa on, että kiinnityslevyn nettoleikkausten vetokestävyys tarkistetaan kiinnityslevyn eri kohdissa.

<u>Poikkileikkaus kiinnityslevyn reunasta lukien ensimmäisen ruuvin reiän kohdalla:</u>

(missä b = 100 + 30 / 240 × 140 = 117,5 mm)

$A_{\mathrm{net}} = A_{\mathrm{g}} - d_0 t$ = 117,5 × 10 – 18 × 10 = 995 mm^2

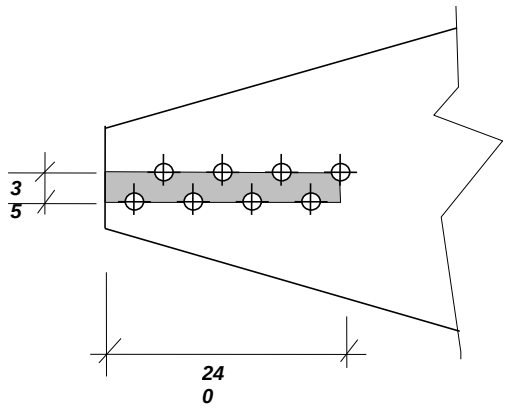
Tämän poikkileikkauksen tulee pystyä siirtämään yhteen ruuviin kohdistuva voima.

Poikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{kA_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} = \frac{1{,}0 \times 995 \times 530}{1{,}25 \times 10^3} = 421 \text{ kN}$$ Kaava 5.24

On ilmeistä, että kiinnityslevyn muita poikkileikkauksia ei tässä tarvitse tarkistaa, koska vaikuttava kuorma ei voi ylittää itse kulmateräksen vetokestävyyden mitoitusarvoa, joka on pienempi kuin yllä saatu arvo

Kiinnityslevyn palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo



Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun ruuvirivit ovat limitetyt: EN 1993-1-8 Kohta 3.10.2(2) Kaava 3.9

$$V_{\mathrm{eff,1,Rd}} = \frac{f_{\mathrm{u}} A_{\mathrm{nt}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}} + \frac{f_{\mathrm{y}} A_{\mathrm{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

$$= \frac{530 \times (35-9) \times 10}{1{,}25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18 + 240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1{,}1 \times 10^3}$$

$$= 110{,}2 + 398{,}4 = 508 \text{ kN}$$

Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun ruuvirivit eivät ole limitetyt: | EN 1993-1-8 Kohta 3.10.2(2) Kaava 3.9

$$V_{\text{eff,1,Rd}} = \frac{f_{\text{u}} A_{\text{nt}}}{\gamma_{\text{M2}}} + \frac{f_{\text{y}} A_{\text{nv}}}{\sqrt{3}\gamma_{\text{M0}}}$$

$$= \frac{530 \times (35 - 2 \times 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (2 \times 240 - 6 \times 18 - 2 \times 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 72,1 + 408,8 = 480 \text{ kN}$$

Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo

Ruuvin ominaisuusluokka 50 ja M16 ruuvin jännityspoikkipinta-ala $A = A_s = 157$ mm^2:

$$F_{\text{v,Rd}} = \frac{\alpha\, f_{\text{ub}} A}{\gamma_{\text{M2}}}$$ | Kaava 7.11

Tekijän α arvo voidaan antaa kansallisessa liitteessä. Suositusarvo on 0,6, joka soveltuu, kun leikkaustaso on ruuvin kierteettömällä tai kierteytyllä osalla. | Kohta 7.2.4

$$F_{\text{v,Rd}} = \frac{\alpha\, f_{\text{ub}} A}{\gamma_{\text{M2}}} = \frac{0,6 \times 500 \times 157}{1,25 \times 10^3} = 37,7 \text{ kN}$$

Ruuviryhmän leikkauskestävyyden mitoitusarvo:
$n_b F_{\text{v,Rd}} = 8 \times 37,7 = 302$ kN

Ruuvien/kiinnityslevyn reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo

Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo ruuviliitoksille: | Kohta 7.2.3

$$F_{\text{b,Rd}} = \frac{2,5\alpha_{\text{b}}\, k_{\text{t}}\, t\, d\, f_{\text{u}}}{\gamma_{\text{M2}}}$$ | Kaava 7.1

Päätyetäisyydet ovat e_1 = 30 mm, reunaetäisyys e_2 = 25 mm (> $1,2d_0$ = 21,6 mm), ja ruuvien keskiöetäisyydet p_1 = 60 mm ja p_2 = 35 mm. Kiinnityslevyn ainepaksuus t = 10 mm ja ruuvien koko M16.

Ruuviliitokset on luokiteltu kahteen ryhmään perustuen kiinnityslevyn ainepaksuuteen (kts. käsikirja Kohta 7.2.3). | Kohta 7.2.3

Tässä esimerkissä käsitellään kiinnityksiä, kun levynpaksuudet ovat suuria (t = 10 mm) eivätkä muodonmuutokset ole suunnittelua rajoittava.

Reunimmaiselle ruuville, missä e_1 = 30 mm ja p_1 = 60 mm reunapuristuksen kerroin α_b kuorman vaikutussuunnassa on seuraava:

$$\alpha_{\text{b}} = \min \begin{Bmatrix} 1,0 \\ \dfrac{e_1}{3d_0} \end{Bmatrix}$$

$$= \min \begin{Bmatrix} 1,0 \\ \dfrac{30}{3 \times 18} = 0,556 \end{Bmatrix} = 0,556$$

Reunapuristuksen kerroin k_t kohtisuorassa suunnassa vaikuttavaan voimaan on seuraava:

$$k_t = \begin{cases} 1{,}0 & \text{for } \left(\dfrac{e_2}{d_0}\right) > 1{,}5 \\ 0{,}8 & \text{for } \left(\dfrac{e_2}{d_0}\right) \le 1{,}5 \end{cases}$$

$$k_t = 0{,}8 \qquad \text{for } \frac{e_2}{d_0} = \frac{25}{18} = 1{,}39 \le 1{,}5$$

Äärimmäisen ruuvin/reiän reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2{,}5 \times 0{,}556 \times 0{,}8 \times 10 \times 16 \times 530}{1{,}25 \times 10^3} = 75{,}44 \text{ kN}$$

Kaava 7.1

Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo liitokselle:

$n_b F_{b,Rd}$ = 8 × 75,44 = 604 kN

Liitoksen kestävyyden mitoitusarvo murtorajatilassa

Kulmateräksen bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo	$N_{pl,Rd}$	383 kN
Kulmateräksen nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo	$N_{u,Rd}$	391 kN
Kulmateräksen palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo (limitetty liitos)	$V_{eff,2,Rd}$	283 kN
Kulmateräksen palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo (limittämätön liitos)	$V_{eff,2,Rd}$	**274 kN**
Kiinnityslevyn bruttopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo	$N_{pl,Rd}$	480 kN
Kiinnityslevyn vetokestävyyden mitoitusarvo nettoleikkauksessa	$N_{u,Rd}$	892 kN
Kiinnityslevyn nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo	$N_{u,Rd}$	421 kN
Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun ruuvirivit ovat limitetyt	$V_{eff,1,Rd}$	508 kN
Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, kun ruuvirivit eivät ole limitetyt	$V_{eff,1,Rd}$	480 kN
Ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo	$F_{v,Rd}$	302 kN
Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo liitokselle	$F_{b,Rd}$	604 kN

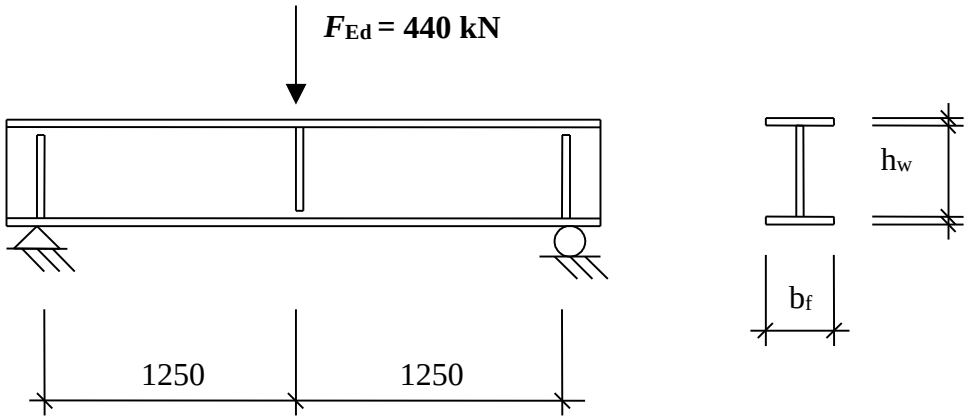
Alhaisin mitoituskestävyys vastaa kulmateräksen palamurtumista (ei limitetyt ruuvirivit):

$V_{eff,2,Rd}$ = 274 kN

HUOM.: Kriittinen vauriomuoto liitoksen kaikille ruuveille on leikkaantuminen ($F_{v,Rd}$ = 302 kN).

MITOITUSESIMERKKI 7 – LEVYPALKIN LEIKKAUSKESTÄVYYS

Levypalkin leikkauskestävyyden laskenta. Palkki on yksiaukkoinen I-profiili ja jänneväli on kuvan mukainen. Ylälaippa on tuettu sivusuunnassa



Teräslaji: Lean duplex 1.4162

f_y = 480 N/mm² kuumavalssattu nauha — Taul. 2.2

E = 200000 N/mm² — Kohta 2.3.1

Kokeillaan poikkileikkausta

Laipat:	12×200 mm²
Uuma:	4×500 mm²
Jäykisteet:	12×98 mm²
Hitsin paksuus:	4 mm

Rakenneanalyysi

Leikkausvoiman ja momentin maksimiarvot:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{440}{2} = 220\,\text{kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{440 \times 2{,}5}{4} = 275\,\text{kNm}$$

Osavarmuusluvut

γ_{M0} = 1,1 — Taul. 4.1

γ_{M1} = 1,1

Poikkileikkausluokka

Kohta 5.3

Taul. 5.2

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{480} \times \frac{200}{210}} = 0{,}683$$

Uuman taivutus — Taul. 5.2

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500-2\times\sqrt{2}\times 4}{4\times 0,683} = 178,9 > 90$$ uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

Puristettu laippa — Taul. 5.2

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200-4-2\times\sqrt{2}\times 4}{2\times 12\times 0,683} = 11,3 \le 14,0$$ puristuslaippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 3.

Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

Leikkauskestävyys — Kohta 6.4.3

Leikkauslommahdus tulee tarkistaa, jos uuman pystyjäykisteille $h_w / t_w \ge \frac{24,3}{\eta}\varepsilon\sqrt{k_\tau}$

a/h_w = 1250/500 = 2,5 > 1, ja koska uuma on jäykistämätön, $k_{\tau st}$=0. Siten,

$$k_\tau = 5,34 + 4\left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 5,34 + 4\left(\frac{500}{1250}\right)^2 = 5,98$$ — Kaava 6.26

EN 1993-1-4 suositusarvo on $\eta = 1,2$ — Kohta 6.4.3

$$h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \ge \frac{24,3}{1,2}\times 0,683\times\sqrt{5,98} = 33,8$$

Leikkauslommahdus tulee tarkistaa. Saadaan:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \le \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\,\gamma_{M1}} = \frac{1,2\times 480\times 500\times 4}{\sqrt{3}\times 1,1}\times 10^{-3} = 604,6 \text{ kN}$$ — Kaava 6.22

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\,\gamma_{M1}}$$ — Kaava 6.23

Kun ei-jäykkä päätyjäykiste:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon\sqrt{k_\tau}}\right) = \left(\frac{500}{37,4\times 4\times 0,683\times\sqrt{5,98}}\right) = 2,00 > 0,65$$ — Kaava 6.25

$$\chi_w = \frac{1,19}{\left(0,54+\bar{\lambda}_w\right)} \qquad \text{for } \bar{\lambda}_w \ge 0,65$$ — Taul. 6.3

Siten uuman osuus lasketaan:

$$\chi_w = \frac{1,19}{\left(0,54+2,00\right)} = 0,468$$ — Taul. 6.3

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = \frac{0,468\times 480\times 500\times 4}{\sqrt{3}\times 1,1}\times 10^{-3} = 235,9 \text{ kN}$$ — Kaava 6.23

Laippoja voidaan hyödyntää leikkauslommahduskestävyyden laskennassa, jos laippoja ei ole täysin hyödynnetty taivutuskestävyyttä laskettaessa. Pelkästään laippojen perusteella laskettu taivutuskestävyys on: — Kohta 6.4.3

$$M_{f,Rd} = 12\times 200\times\frac{480}{1,1}\times(500+12)\times 10^{-6} = 536,2 \text{ kNm}$$

$M_{f,Rd} > M_{Ed}$ = 275 kNm, joten laippoja voidaan hyödyntää leikkauslommahduskestävyyttä laskettaessa.

$$V_{\mathrm{bf,Rd}} = \frac{b_{\mathrm{f}} t_{\mathrm{f}}^2 f_{\mathrm{yf}}}{c\gamma_{M1}}\left[1-\left[\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{f,Rd}}}\right]^2\right]$$ Kaava 6.29

$$c = a\left[0{,}17+\frac{3{,}5 b_{\mathrm{f}} t_{\mathrm{f}}^2 f_{\mathrm{yf}}}{t_{\mathrm{w}} h_{\mathrm{w}}^2 f_{\mathrm{yw}}}\right] \quad \text{mutta} \quad \frac{c}{a} \le 0{,}65$$ Kaava 6.30

$$= 1250\times\left[0{,}17+\frac{3{,}5\times 200\times 12^2\times 480}{4\times 500^2\times 480}\right] = 338{,}5\ \mathrm{mm}$$

$$338{,}5\mathrm{mm} < 0{,}65\times 1250 = 812{,}5\,\mathrm{mm}$$

$$V_{\mathrm{bf,Rd}} = \frac{200\times 12^2\times 480}{338\times 1{,}1}\times\left[1-\left[\frac{275}{536{,}2}\right]^2\right] = 27{,}4\ \mathrm{kN}$$ Kaava 6.29

$$V_{\mathrm{b,Rd}} = V_{\mathrm{bw,Rd}} + V_{\mathrm{bf,Rd}} = 235{,}8 + 27{,}4 = 263{,}2\ \mathrm{kN} \le 604{,}6\ \mathrm{kN}$$ Kaava 6.22

Pystyjäykisteet Kohta 6.4.5

Pystyjäykisteet tarkistetaan myötäämiselle ja taivutusnurjahdukselle käyttäen arvoja α = 0,49 ja $\bar{\lambda}_0$ = 0,2. Käytetään jäykisteiden ja osan uumaa muodostamaa tehollista poikkileikkausta. Uumasta mukaan laskettavan osan leveys on $11\varepsilon t_w$. Poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 3. Taul. 6.1

$a/h_{\mathrm{w}} = 1250/500 = 2{,}5 \ge \sqrt{2}$, joten välijäykisteiden hitausmomentin tulee täyttää seuraava ehto: Kaava 6.51

$$I_{\mathrm{st}} \ge 0{,}75 h_{\mathrm{w}} t_{\mathrm{w}}^3 = 0{,}75\times 500\times 4^3 = 24000\ \mathrm{mm}^4$$ Kaava 6.51

$$I_{\mathrm{st}} = 2\times\frac{(11\times 0{,}683\times 4)\times 4^3}{12} + \frac{12\times 200^3}{12} = 8{,}00\times 10^6\ \mathrm{mm}^4$$, ehto täyttyy.

Myötäämiseen perustuva kestävyys lasketaan seuraavasti:

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M0}}$$ Kaava 5.27

$$A_{\mathrm{g}} = (12\times 200 + 11\times 0{,}683\times 4\times 2) = 2460{,}1\ \mathrm{mm}^2$$

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = 2460{,}1\times 480\times 10^{-3}/1{,}1 = 1073{,}5\,\mathrm{kN}$$

Nurjahduskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \chi A f_{\mathrm{y}}/\gamma_{\mathrm{M1}}$$ Kaava 6.2

$$\chi = \frac{1}{\varphi+\left[\varphi^2-\bar{\lambda}^2\right]^{0{,}5}} \le 1$$ Kaava 6.4

$$\varphi = 0{,}5\left(1+\alpha\left(\bar{\lambda}-\bar{\lambda}_0\right)+\bar{\lambda}^2\right)$$ Kaava 6.5

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{\mathrm{cr}}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{f_{\mathrm{yw}}}{E}}$$ Kaava 6.6

$$L_{\mathrm{cr}} = 0{,}75 h_{\mathrm{w}} = 0{,}75\times 500 = 375\ \mathrm{mm}$$ Kohta 6.4.5

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{\frac{8\times 10^6}{2460{,}1}}}\times\frac{1}{\pi}\times\sqrt{\frac{480}{200000}} = 0{,}103$$ Kaava 6.6

$$\varphi = 0{,}5\times\left(1+0{,}49\times(0{,}103-0{,}2)+0{,}103^2\right) = 0{,}48$$ Kaava 6.5

$$\chi = \frac{1}{0{,}48 + \left[0{,}48^2 - 0{,}103^2\right]^{0{,}5}} = 1{,}05 > 1 \quad \Rightarrow \chi = 1{,}0$$ Kaava 6.4

Koska $N_{b,Rd} = N_{c,Rd}$ =1073,5 kN > N_{Ed}, ja pystyjäykisteet ovat riittäviä.

Leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus

Jos leikkauskestävyyden hyväksikäyttöaste η_3 on suurempi kuin 0,5, tarkistetaan leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutus. Kohta 6.4.3

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1{,}0$$ Kaava 6.36

$\bar{\eta}_3 = \frac{220}{235{,}9} = 0{,}933 > 0{,}5$, joten yhteisvaikutus tulee tarkistaa.

Mitoitusehto on

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)\left(2\bar{\eta}_3 - 1\right)^2 \leq 1{,}0 \text{ for } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$ Kaava 6.34

Missä:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$ Kaava 6.35

$M_{f,Rd}$ = 536,2 kNm (sivu3)

$M_{pl,Rd}$ poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo.

$$M_{pl,Rd} = M_{f,Rd} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4\gamma_{M0}} = 536{,}2 + \frac{4 \times 500^2 \times 480}{4 \times 1{,}1 \times 10^6} = 645{,}3\,\text{kNm}$$

Ehtojen tarkistus

M_{Ed} = 275 kNm, siten:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{275}{645{,}3} = 0{,}426 \leq 1{,}0 \text{ OK}$$ Kaava 6.35

Tarkistetaan vielä yhteisvaikutus.

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)\left(2\bar{\eta}_3 - 1\right)^2 = 0{,}426 + \left(1 - \frac{536{,}2}{645{,}3}\right) \times \left(2 \times 0{,}933 - 1\right)^2 = 0{,}553 < 1{,}0$$

Levypalkin kestävyys leikkauksen, taivutuksen ja niiden yhteisvaikutuksen suhteen on riittävä

Tehollisten poikkileikkaussuureiden laskenta

Laipat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 3 ja ovat täysin tehollisia.

Uuman tehollinen leveys lasketaan seuraavasti käyttäen pienennystekijää ρ, uuma hitsattu.

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} \leq 1$$ Kaava 5.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{missä } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488{,}68 \text{ mm}$$ Kaava 5.3

Olettaen, että uuman taivutusjännitysjakautuma on lineaarinen ja symmetrinen, saadaan ψ

$$= \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

$\Rightarrow k_\sigma = 23{,}9$ — Taul. 5.3

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488{,}68/4}{28{,}4 \times 0{,}683 \times \sqrt{23{,}9}} = 1{,}29$$ — Kaava 5.3

$$\rho = \frac{0{,}772}{1{,}29} - \frac{0{,}079}{1{,}29^2} = 0{,}55 \le 1$$ — Kaava 5.1

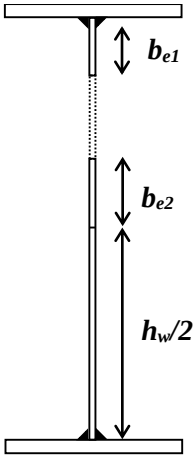
$b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, \bar{b} / (1\text{-}\psi) = 0{,}55 \times 488{,}68/(1-(-1)) = 134{,}76$ mm — Taul. 5.3

$b_{e1} = 0{,}4 b_{eff} = 0{,}4 \times 134{,}76 = 53{,}9$ mm — Taul. 5.3

$b_{e2} = 0{,}6 b_{eff} = 0{,}6 \times 134{,}76 = 80{,}9$ mm

<u>Tehollisen taivutusvastuksen laskenta</u>

e_i on positiivinen ylälaipan painopisteestä alaspäin.



$$A_{eff} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + \left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) t_w + b_{e2} t_w + \left(h_w/2\right) t_w = 6361{,}7 \text{ mm}^2$$

$e_{eff} =$

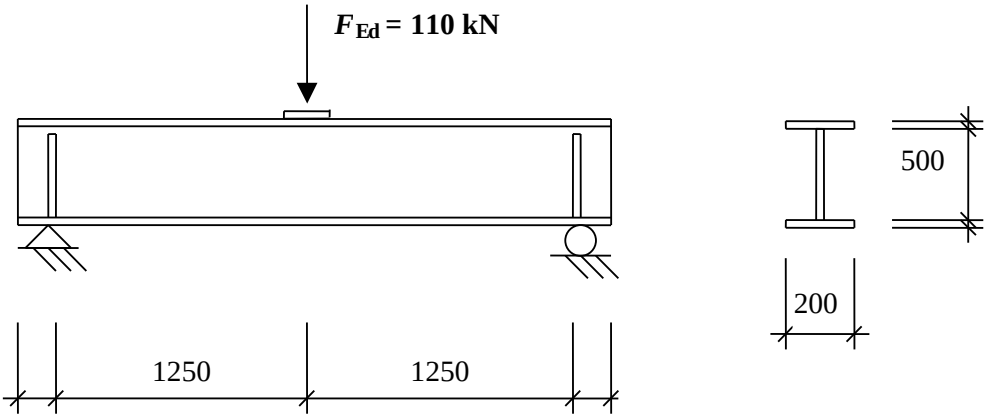
$$\frac{1}{A_{eff}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{eff}} \left[b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f) \right] + \frac{1}{A_{eff}} \left[\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) t_w \left(0{,}5\left(\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) + t_f\right)\right) \right.$$
$$\left. + b_{e2} t_w \left(0.5\left(h_w + t_f\right) - b_{e2}/2\right) + \left(h_w/2\right) t_w \left(0{,}75 h_w + 0{,}5 t_f\right) \right] = 266{,}4 \text{ mm}$$

$$I_{eff} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{eff} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w \left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right)^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w \left(h_w/2\right)^3}{12}$$
$$+ b_f t_f \left(e_{eff} - 0\right)^2 + b_f t_f \left[e_{eff} - \left(h_w + t_f\right)\right]^2 + \left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) t_w \left[e_{eff} - 0{,}5\left(\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) + t_f\right)\right]^2$$
$$+ b_{e2} t_w \left[e_{eff} - 0{,}5\left(h_w + t_f - b_{e2}\right)\right]^2 + \left(h_w/2\right) t_w \left[e_{eff} - \left(0{,}75 h_w + 0{,}5 t_f\right)\right]^2$$
$$= 3{,}472 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

MITOITUSESIMERKKI 8 – KESTÄVYYS PISTEKUORMILLE

Edellisen esimerkin mukainen levypalkki, mutta siihen kohdistuukin nyt pistekuorma. Tarkistetaan kestääkö ko. levypalkki pistekuorman, joka välittyy palkkiin 12 mm paksun levyn kautta. Palkki on vapaasti päistään tuettu yksiaukkoinen I-profiili, jonka jänneväli on kuvan mukainen. Ylälaippa on tuettu sivusuunnassa.

.



Teräslaji 1.4462

f_y = 460 N/mm^2, kuumavalssattu — Taul. 2.2

E = 200000 N/mm^2 — Kohta 2.3.1

Laipat:	12 × 200 mm^2
Uuma:	4 × 500 mm^2
Jäykisteet:	12 × 98 mm^2
Hitsin paksuus:	4 mm

Rakenneanalyysi

Leikkausvoiman ja momentin suurimmat arvot:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{110}{2} = 55\ \text{kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}\,L}{4} = \frac{110 \times 2{,}5}{4} = 68{,}75\ \text{kNm}$$

Osavarmuusluvut

γ_{M0} = 1,1 — Taul. 4.1

γ_{M1} = 1,1

Poikkileikkausluokka

Kohta 5.3

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{460} \times \frac{200}{210}} = 0{,}698$$

Taul. 5.2

Uuma, taivutus — Taul. 5.2

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2\times\sqrt{2}\times 4}{4\times 0{,}698} = 175{,}1 > 90$$, uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 4

Puristettu laippa: — Taul. 5.2

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2\times\sqrt{2}\times 4}{2\times 12\times 0{,}698} = 11{,}0 \le 14{,}0$$, laippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 3

Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 4.

Kestävyys pistekuormalle — Kohta 6.4.4

Pistekuorman mitoitusarvo ei saa ylittää vastaavaa kestävyyttä

$$F_{\mathrm{Rd}} = f_{\mathrm{yw}} L_{\mathrm{eff}} t_w / \gamma_{\mathrm{M1}}$$ — Kaava 6.37

Teollinen mitta L_{eff} lasketaan seuraavasti:

$$L_{\mathrm{eff}} = \chi_{\mathrm{F}} l_{\mathrm{y}}$$ — Kaava 6.45

missä pienennystekijä on:

$$\chi_{\mathrm{F}} = \frac{0{,}5}{\bar{\lambda}_{\mathrm{F}}} \le 1.0$$ — Kaava 6.46

hoikkuudenarvolla, joka lasketaan:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{F}} = \sqrt{\frac{l_{\mathrm{y}} t_{\mathrm{w}} f_{\mathrm{yw}}}{F_{\mathrm{cr}}}}$$ — Kaava 6.47

Tehollinen kuormituspituus lasketaan kaavasta:

$$l_{\mathrm{y}} = s_{\mathrm{s}} + 2t_{\mathrm{f}}\left(1+\sqrt{m_1 + m_2}\right)$$ — Kaava 6.41

missä
s_{s} on jäykän tukipinnan pituus ja m_1 ja m_2 ovat dimensiottomia parametreja:

$$m_1 = \frac{f_{\mathrm{yf}} b_{\mathrm{f}}}{f_{\mathrm{yw}} t_{\mathrm{w}}}$$ — Kaava 6.38

$$m_2 = 0{,}02\left(\frac{h_{\mathrm{w}}}{t_{\mathrm{f}}}\right)^2 \quad \text{for } \bar{\lambda}_{\mathrm{F}} > 0{,}5$$ — Kaava 6.39

$$m_2 = 0 \quad \text{for } \bar{\lambda}_{\mathrm{F}} \le 0{,}5$$ — Kaava 6.40

s_{s} voidaan varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena ottaa kaksi kertaa kuormaa kantavan levyn paksuus, eli 24 mm. — Kuva 6.5

$$m_1 = \frac{460\times 200}{460\times 4} = 50$$ — Kaava 6.38

$$m_2 = 0{,}02\times\left[\frac{500}{12}\right]^2 = 34{,}7$$, oletuksena $\bar{\lambda}_{\mathrm{F}} > 0{,}5$ — Kaava 6.39

$$l_{\mathrm{y}} = 24 + 2\times 12\times\left(1+\sqrt{50+34{,}7}\right) = 268{,}9 \text{ mm}$$ — Kaava 6.41

Kriittinen kuorma saadaan kaavasta:

$$F_{\mathrm{cr}} = 0{,}9 k_{\mathrm{F}} E \frac{t_{\mathrm{w}}^3}{h_{\mathrm{w}}}$$ — Kaava 6.48

Missä nurjahduskerroin kuormitustapaukselle a saadaan seuraavasti:

$$k_F = 6+2\left[\frac{h_w}{a}\right]^2 = 6+2\times\left[\frac{500}{2500}\right]^2 = 6{,}08$$ Kuva 6.4

$$F_{cr} = 0{,}9\times 6{,}08\times 200000\times\frac{4^3}{500}\times 10^{-3} = 140{,}1\,\text{kN}$$ Kaava 6.48

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{268{,}9\times 4\times 460}{140{,}1\times 10^3}} = 1{,}88 > 0{,}5\text{, oletus OK}$$ Kaava 6.47

$$\chi_F = \frac{0{,}5}{1{,}88} = 0{,}27 \le 1{,}0\text{, OK}$$ Kaava 6.46

$$L_{eff} = 0{,}27\times 268{,}9 = 72{,}6\,\text{mm}$$

$$F_{Ed} = 110 \le 460\times 72{,}6\times 4/(1{,}1\times 10^3) = 121{,}4\,\text{kN}$$ Kaava 6.37

Siten kestävyys ylittää kuormituksen.

Pistekuorman ja taivutuksen yhteisvaikutus

Pistekuorman ja taivutuksen yhteisvaikutus tarkistetaan standardin EN1993-1-5:2006 mukaisesti.

$$0{,}8\times\eta_1+\eta_2 \le 1{,}4$$ EN 1993-1-5, Kaava 7.2

missä

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}/\gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed}+N_{Ed}\,e_N}{f_y W_{eff}/\gamma_{M0}} \le 1{,}0$$ EN 1993-1-5, Kaava 4.14

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff}\, t_w/\gamma_{M1}} \le 1{,}0$$ EN 1993-1-5, Kaava 6.14

Tehollisten poikkileikkaussuureiden laskenta

Laipat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 3 ja ovat siten täysin teholliset.

Uuman tehollinen leveys lasketaan pienennystekijän ρ avulla. Uuma on hitsattu.

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^{\,2}} \le 1$$ Kaava 5.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$ missä b =d = $500-2\times 4\times\sqrt{2} = 488{,}68$ mm Kaava 5.3

Oletetaan, että uuman taivutusjännitys muuttuu lineaarisesti ja on symmetrinen, joten saadaan:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

$$\Rightarrow k_\sigma = 23{,}9$$ Taul. 5.3

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488{,}68/4}{28{,}4\times 0{,}698\times\sqrt{23{,}9}} = 1{,}26$$

$$\rho = \frac{0{,}772}{1{,}26} - \frac{0{,}079}{1{,}26^2} = 0{,}562 \le 1$$

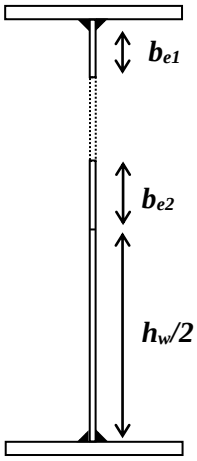
$$b_{eff} = \rho\, b_c = \rho\, b/(1-\psi) = 0{,}562\times 488{,}68/(1-(-1)) = 137{,}3\,\text{mm}$$ Taul. 5.3

$b_{e1} = 0{,}4b_{eff} = \ 0{,}4 \times 137{,}3 \ = \ 54{,}9$ mm

$b_{e2} = 0{,}6b_{eff} = \ 0{,}6 \times 137{,}3 \ = \ 82{,}4$ mm

Lasketaan Tehollinen taivutusvastus.

e_i on positiivinen ylälaipan painopisteestä alaspäin.



$$A_{eff} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + \left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right)t_w + b_{e2}t_w + \left(h_w / 2\right)t_w = 6372{,}2 \text{ mm}^2$$

e_{eff}=

$$\frac{1}{A_{eff}}\sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{eff}}\left[\ b_f t_f\left(0\right) + b_f t_f\left(h_w + t_f\right)\right] + \frac{1}{A_{eff}}\left[\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right)t_w\left(0{,}5\left(\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) + t_f\right)\right)\right.$$

$$\left. + \ b_{e2}t_w\left(0{,}5\left(h_w + t_f\right) - b_{e2}/2\right) + \left(h_w/2\right)t_w\left(0{,}75h_w + 0{,}5t_f\right)\ \right] = 266{,}4 \text{ mm}$$

$$I_{eff} = \sum_i I_i + \sum_i A_i(e_{eff} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^{\,3}}{12} + \frac{t_w\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right)^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^{\,3}}{12} + \frac{t_w\left(h_w/2\right)^3}{12}$$

$$+ \ b_f t_f\left(e_{eff} - 0\right)^2 + b_f t_f\left[e_{eff} - \left(h_w + t_f\right)\right]^2 + \left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right)t_w\left[e_{eff} - 0{,}5\left(\left(b_{e1} + 4\sqrt{2}\right) + t_f\right)\right]^2$$

$$+ \ b_{e2}t_w\left[e_{eff} - 0{,}5\left(h_w + t_f - b_{e2}\right)\right]^2 + \left(h_w/2\right)t_w\left[e_{eff} - \left(0{,}75h_w + 0{,}5t_f\right)\right]^2$$

$= 3{,}475 \times 10^8$ mm^4

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{e_{eff} + 0{,}5t_f} = 1{,}293 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\eta_1 = \frac{68{,}75 \times 10^6}{460 \times 1{,}293 \times 10^6 / 1{,}1} = 0{,}127$$

EN 1993-1-5 Kaava 4.14

$$\eta_2 = \frac{110}{119{,}63} = 0{,}919$$

EN 1993-1-5 Kaava 6.14

$$0{,}8\eta_1 + \eta_2 = 0{,}8 \times 0{,}1293 + 0{,}919 = 1{,}021 < 1{,}4$$

Siten levypalkin kestävyys pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutukselle on riittävä.

Leikkauskestävyys

Kohta 6.4.3

Leikkauslommahduskestävyys tarkistetaan kun $h_w / t_w \geq \frac{56{,}2}{\eta}\varepsilon$ jäykistämättömälle uumalle.

Kaava 6.20

$h_w / t_w = 500/4 = 125 \geq \frac{56,2}{1,2} \times 0,698 = 32,7$

Leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa. Tarkistus tehdään seuraavasti:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}$$ Kaava 6.22

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\gamma_{M1}\sqrt{3}}$$ Kaava 6.23

Ei-jäykille päätytuille saadaan taulukosta 6.3:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon}\right) = \left(\frac{500}{86,4 \times 4 \times 0,698}\right) = 2,07 > 0,65$$ Kaava 6.24

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + \bar{\lambda}_w} \qquad \text{for } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$$ Taul. 6.3

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + 2,07} = 0,455$$ Taul. 6.3

Laippojen osuus leikkauslommahduskestävyyteen voidaan ottaa huomioon, jos laipat eivät ole täysin hyödynnetty taivutusmomenttikestävyyttä laskettaessa. Laippojen osuus on kuitenkin pieni ja sitä ei tässä oteta huomioon, ts. $V_{bf,Rd} = 0$.

Leikkauslommahduskestävyys lasketaan seuraavasti:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \frac{0,455 \times 460 \times 500 \times 4}{1,1 \times \sqrt{3}} \times 10^{-3} = 219,8 \text{ kN} < \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 579,45 \text{ kN}$$ Kaava 6.23

$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} > V_{Ed} = 55$ kN

Levypalkin leikkauskestävyys on riittävä.

Leikkausvoiman ja taivutuksen yhteisvaikutus

Jos $\bar{\eta}_3$ on pienempi kuin 0,5, taivutusmomentin ja aksiaalivoiman mitoituskestävyyden arvoja ei tarvitse pienentää leikkausvoiman vaikutuksesta.

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$ Kaava 6.36

$= \frac{55}{219,8} = 0,25 \leq 0,5$, joten yhteisvaikutusta ei tarvitse tarkistaa.

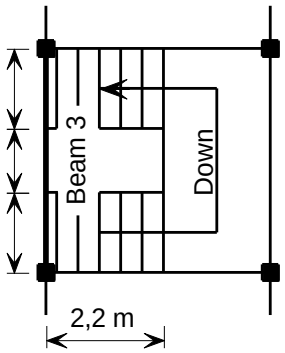
Yhteenveto

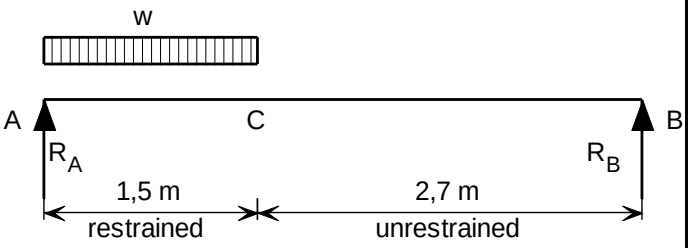
Levypalkin kestävyys on riittävä. Tukien pystyjäykisteitä ei tässä esimerkissä ole tarkistettu. Tarkistus tehdään mitoitusesimerkissä 7 esitetyn menetelmän mukaan.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	Title	Mitoitusesimerkki 9 – Palkki, jonka puristettu laippa on tukematon		
CALCULATION SHEET	Client	Research Fund for Coal and Steel	Made by SMH	Date 09/01
			Revised by NRB	Date 04/06
			Revised by SJR	Date 04/17

MITOITUSESIMERKKI 9 – PALKKI, JONKA PURISTETTU LAIPPA ON TUKEMATON

Suunnitellaan portaita tukeva palkki. Palkki on päistään nivelellisesti tuettu U-profiili. Portaan tukeutuvat palkkiin välillä AC ja ko. välillä palkin ylälaippa on sivusuunnassa tuettu. Välillä BC palkin ylälaippa on sivusuunnassa tukematon. Palkin jänneväli on 4,2 m.





Kuormat

Oletetaan, että palkkiin kohdistuu puolet portaan koko kuormituksesta.

Pysyvät kuormat (G): portaiden paino 1,0 kN/m^2 = 1,0 × 2,2 = 2,2 kN/m

Palkin omapaino 0,13 kN/m

Muuttuvat kuormat (Q): kuormitus portaista 4 kN/m^2 = 4,0 × 2,2 = 8,8 kN/m

Tarkasteltava kuormitustapaus (murtorajatila):

$$\sum_{j\geq 1}\gamma_{G,j}G_{k,j} + \gamma_{Q,1}Q_{k,1} + \sum_{i>1}\gamma_{Q,i}\psi_{0,i}Q_{k,i}$$

Koska rakenteeseen kohdistuu ainoastaan yksi muuttuva kuorma ($Q_{k,1}$) yllä olevan yhtälön viimeistä temiä ei oteta huomioon tässä mitoitusesimerkissä.

$\gamma_{G,j}$ = 1,35 (epäedulliset vaikutukset)
$\gamma_{Q,1}$ = 1,5

Laskentakuormitukset

Pysyvä kuorma:	Portaiden paino	=	1,35 × 2,2	= 2,97 kN/m
	Palkin omapaino	=	1,35 × 0,13	= 0,18 kN/m
Muuttuva kuorma:	Kuormitus portaista	=	1,5 × 8,8	= 13,2 kN/m

Rakenneanalyysi

Kokonaiskuorma:

$R_A + R_B$ = (2,97 + 13,2) × 1,5 + 0,18 × 4,2 = 25,01 kN

Tukireaktiot pisteessä A ja B:

$$R_B = \frac{1{,}5\times(2{,}97+13{,}2)\times 0{,}75+0{,}18\times 4{,}2\times(4{,}2/2)}{4{,}2} = 4{,}71 \text{ kN}$$

$\Rightarrow R_A = 25{,}01 - 4{,}71 = 20{,}30$ kN

Suurin taivutusmomentti on etäisyydellä $1{,}5\times\left(1-\frac{1{,}5}{2\times 4{,}2}\right) = 1{,}23$ m pisteestä A.

$$M_{Ed,max} = 20{,}30\times 1{,}23-(2{,}97+13{,}2)\times\frac{1{,}23^2}{2}-0{,}18\times\frac{1{,}23^2}{2} = 12{,}60 \text{ kNm}$$

Suurin leikkausvoima esiintyy pisteessä *A*:

$F_{Ed,max} = 20{,}30$ kN

Materiaaliominaisuudet

Austeniittinen teräslaji 1.4401

0,2% -raja = 240 N/mm^2 (kylmävalssattu levy) — Taul. 2.2

$f_y = 240$ N/mm^2

E = 200000 N/mm^2 ja G = 76900 N/mm^2 — Kohta 2.3.1

$\Rightarrow$ Kokeillaan U-profiili 200 × 75 ainepaksuus t = 5 mm.

Poikkileikkausarvot

$I_y = 9{,}456\times 10^6$ mm^4	$W_{el,y} = 94{,}56\times 10^3$ mm^3
$I_z = 0{,}850\times 10^6$ mm^4	$W_{pl,y} = 112{,}9\times 10^3$ mm^3
$I_w = 5085\times 10^6$ mm^4	$A_g = 1650$ mm^2
$I_t = 1{,}372\times 10^4$ mm^4	

Poikkileikkausluokitus — Kohta 5.3.2

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}} = \sqrt{\frac{235}{240}\times\frac{200\,000}{210\,000}} = 0{,}97$$ — Taul. 5.2

Varmalla puolella olevana oletuksena $c = h - 2t = 200 - 2\times 5 = 190$ mm uumalle

Uumaan kohdistuu taivutus: $\frac{c}{t} = \frac{190}{5} = 38$

Poikkileikkausluokalle 1, $\frac{c}{t} \le 72\varepsilon = 69{,}8$, siten uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1. — Taul. 5.2

Yhdeltä reunalta tuettuun laippaan kohdistuu puristus: $\frac{c}{t} = \frac{75}{5} = 15$

Poikkileikkausluokka 3, $\frac{c}{t} \le 14\varepsilon = 13{,}6$, siten laippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 4 — Taul. 5.2

4.

$\Rightarrow$ Koko Poikkileikkauksen poikkileikkausluokka on 4.

Teholliset poikkileikkausominaisuudet — Kohta 5.4.1

Lasketaan pienennystekijä ρ kylmämuovatulle yhdeltä reunaltaan tuetulle laipalle:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{mutta} \leq 1$$ — Kaava 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{missä } \bar{b} = c = 75 \text{ mm}$$ — Kaava 5.3

Puristuslaipan puristusjännitys on tasaisesta jakautunut

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \quad \Rightarrow k_\sigma = 0{,}43$$ — Taul. 5.4

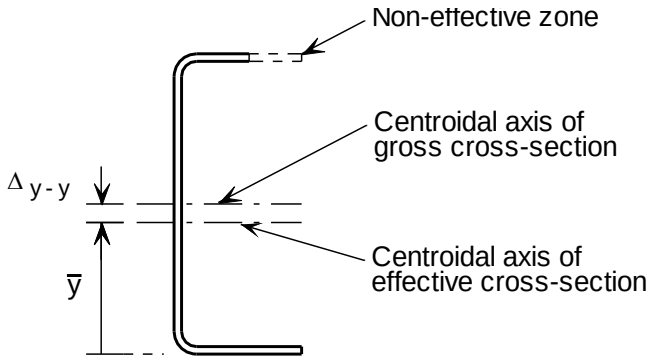
$$\bar{\lambda}_p = \frac{75/5}{28{,}4 \times 0{,}97 \times \sqrt{0{,}43}} = 0{,}830$$

$$\rho = \frac{1}{0{,}830} - \frac{0{,}188}{0{,}830^2} = 0{,}932$$

$c_{eff} = \rho \times c = 0{,}932 \times 75 = 69{,}9$ — Taul. 5.4

$$A_{eff} = A_g - (1-\rho)ct = 1650 - (1-0{,}932) \times 75 \times 5 = 1625 \text{ mm}^2$$

Lasketaan neutraaliakselin siirtymä taivutuksesta



$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} - (1-\rho) \times c \times t \times \left(h - \frac{t}{2}\right)}{A_{eff}} = \frac{1650 \times \frac{200}{2} - (1-0{,}932) \times 75 \times 5 \times \left(200 - \frac{5}{2}\right)}{1625}$$

$$\bar{y} = 98{,}44$$

Neutraaliakselin siirtymä, $\Delta_{y-y} = \frac{h}{2} - \bar{y} = \frac{200}{2} - 98{,}44 = 1{,}56 \text{ mm}$

$$I_{eff,y} = \left(I_y - \frac{(1-\rho)ct^3}{12} - (1-\rho)ct\left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2}\right)^2 - A_{eff}\,\Delta_{y\text{-}y}^2 \right)$$

$$I_{eff,y} = 9{,}456 \times 10^6 - \frac{(1-0{,}932) \times 75 \times 5^3}{12} - (1-0{,}932) \times 75 \times 5 \times (100 - 2{,}5)^2 - 1625 \times 1{,}56^2$$

$$I_{eff,y} = 9{,}21 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff,y}} = \frac{I_{\text{eff,y}}}{\frac{h}{2}+\Delta_{\text{y-y}}} = \frac{9,21\times10^6}{\frac{200}{2}+1,56} = 90,69\times10^3 \text{ mm}^3$$

Leikkausviive — Kohta 5.4.2

Leikkausviive voidaan jättää huomioon ottamatta, jos $b_0 \le L_e/50$ yhdeltä reunaltaan tuetulle taso-osalle.

L_e = 4200 mm (momentin nollakohtien välinen etäisyys)

$L_e/50$ = 84 mm, b_0 = 75 mm, leikkausviive voidaan jättää huomioon ottamatta.

Laipan kaareutuminen — Kohta 5.4.2

EN 1993-1-3 Kohta 5.4 Kaava. 5.3a

$$u = \frac{2\,\sigma_a^2\,b_s^4}{E^2\,t^2\,z}$$

σ_a = 240 N/mm^2 (suurin mahdollinen arvo)

b_s = 75 – 5 = 70 mm

z = 100 – 2,5 = 97,5 mm

$$u = \frac{2\times240^2\times70^4}{200000^2\times5^2\times97,5} = 0,028 \text{ mm}$$

Laipan kaareutuminen voidaan jättää huomioon ottamatta, jos u < 0,05 × 200 = 10 mm

Laipan kaareutuminen voidaan siis jättää huomioon ottamatta.

Osavarmuusluvut

Tässä esimerkissä käytetään seuraavia osavarmuuslukuja:

γ_{M0} = 1,1 and γ_{M1} = 1,1 — Taul. 4.1

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

Poikkileikkausluokka 4

$$M_{c,Rd} = W_{\text{eff,min}}\,f_y/\gamma_{M0} = \frac{90,69\times10^3\times240}{1,1\times10^6} = 19,79 \text{ kNm}$$ — Kaava 5.31

$M_{Ed,max}$ = 12,60 kNm < $M_{c,Rd}$ = 19,79 kNm

⇒ Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on riittävä.

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys

$$V_{pl,Rd} = A_v\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0}$$ — Kaava 5.32

A_v = h × t = 200 × 5 = 1000 mm^2

$$V_{pl,Rd} = \frac{1000\times240}{\sqrt{3}\times1,1\times1000} = 125,97 \text{ kN}$$

$F_{Ed,max}$ = 20,30 kNm < $V_{pl,Rd}$ = 125,97 kNm

⇒ poikkileikkauksen leikkauskestävyys on riittävä. OK.

Leikkauslommahduksen tarkastus: — Kohta 6.4.3

Oletetaan, että $h_w = h - 2t$ = 200 – 2 × 5 = 190 mm

$\frac{h_w}{t} = \frac{190}{5} = 38$, Leikkauslommahdus tulee tarkistaa, jos $\frac{h_w}{t} \ge \frac{56,2\varepsilon}{\eta}$ — Kaava 6.20

η = 1,20

$$\frac{h_w}{t} = 38 < \frac{56{,}2\varepsilon}{\eta} = \frac{56{,}2 \times 0{,}97}{1{,}20} = 45{,}4$$

$\Rightarrow$ Leikkauslommahdus ei rajoita leikkauskestävyyttä.

Kiepahduskestävyys — Kohta 6.4.2

Palkin puristettu laippa on sivusuunnassa tukematon välillä BC. Tarkistetaan tämän osan kiepahduskestävyys.

$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}$ poikkileikkausluokassa 4 — Kaava 6.13

$W_{eff,y} = 90{,}69 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left[\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2\right]^{0,5}} \leq 1$$ — Kaava 6.14

$$\phi_{LT} = 0{,}5\left(1 + \alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}4\right) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right)$$ — Kaava 6.15

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$ — Kaava 6.16

Määritetään kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti (M_{cr}): — Liite E

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k\,L)^2}\left(\left[\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k\,L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2\right]^{1/2} - C_2 z_g\right)$$ — Kaava E.1

Kohta *C* on haarukkalaakeroitu ja kohta *B* on jäykästi tuettu kiepahduksen suhteen.
Valitaan varmalla puolella oleva tapaus: $k_z = k_w = 1{,}0$.

C_1 ja C_2 lasketaan momenttipinnan muodon ja tukiehtojen perusteella. — E.3

Taivutusmomentti kuvaajan perusteella, $\psi = 0$, $\Rightarrow$ $C_1 = 1{,}77$ — Taul. E.1

$C_2 = 0$

$$M_{cr} = 1{,}77 \times \frac{\pi^2 \times 200000 \times 0{,}850 \times 10^6}{(1{,}00 \times 2700)^2} \times \left(\left[\left(\frac{1{,}00}{1{,}00}\right)^2 \times \frac{5085 \times 10^6}{0{,}850 \times 10^6} + \frac{(1{,}00 \times 2700)^2 \times 76900 \times 1{,}372 \times 10^4}{\pi^2 \times 200000 \times 0{,}850 \times 10^6}\right]^{0,5}\right)$$

M_{cr} = 41,9 kNm

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{90{,}69 \times 10^3 \times 240}{41{,}9 \times 10^6}} = 0{,}721$$

Kylmämuovatuille profiileille epätarkkuustekijä $\alpha_{LT} = 0{,}34$ — Kohta 6.4.2

$$\varphi_{LT} = 0{,}5 \times \left(1 + 0{,}34 \times (0{,}721 - 0{,}4) + 0{,}721^2\right) = 0{,}814$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0{,}814 + \left[0{,}814^2 - 0{,}721^2\right]^{0,5}} = 0{,}839$$

$M_{b,Rd} = 0{,}839 \times 90{,}69 \times 10^3 \times 240 \times 10^{-6} / 1{,}1$

$M_{b,Rd}$ = 16,60 kNm < M_{Ed} = 12,0 kNm (suurin taivutusmomentti palkin tukemattomalla

osalla)

$\Rightarrow$ Sauva on riittävä kiepahduksen suhteen.

Taipuma — Kohta 6.4.6

Kuormitustapaus (käyttörajatila): $\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i\geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Taipumalaskelmissa käytetään sekanttimodulia, jonka takia tarvitaan pysyvän kuorman ja muuttuvan kuorman aiheuttamat suurimmat jännitykset käyttörajatilassa

Sekanttimoduli $E_S = \left(\frac{E_{S1} + E_{S2}}{2}\right)$ — Kaava 6.52

missä $E_{S,i} = \dfrac{E}{1 + 0,002 \dfrac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\dfrac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y}\right)^n}$ and i = 1,2 — Kaava 6.53

Rakennelaskelmista saadaan:

Pysyvistä kuormista aiheutuva suurin momentti = 1,90 kNm

Hyötykuormasta aiheutuva suurin momentti = 6,68 kNm

Suurin kokonaismomentti käyttörajatilassa = 8,58 kNm

Poikkileikkausluokka 4, jonka takia käytettään tehollista arvoa W_{eff} jännitysten laskennassa

Oletetaan varmalla puolella olevana, että veto-ja puristuslaippojen jännitykset ovat likipitäen yhtä suuret, ts. $E_{S1} = E_{S2}$

Austeniittiselle teräslajille 1.4401, n = 7 — Taul. 6.4

Käyttörajatilan mitoitusjännitys: $\sigma_{i,Ed,ser} = \dfrac{M_{max}}{W_{eff,y}} = \dfrac{8,58 \times 10^6}{90,69 \times 10^3} = 94,6 \text{ N/mm}^2$

$$E_{S,i} = \frac{200000}{1 + 0,002 \times \dfrac{200000}{94,6} \times \left(\dfrac{94,6}{240}\right)^7} = 198757,6 \text{ N/mm}^2$$

Suurin kuormasta w aiheutuva taipuma esiintyy n. 1,9 m:n etäisyydellä tuesta A.

Kuormasta w aiheutuva taipuma etäisyydellä x tuesta A saadaan kaavasta:

kun $x \geq a$: $\delta = \dfrac{waL^4}{24aE_S I} n^2 \left[2m^3 - 6m^2 + m(4 + n^2) - n^2\right]$ — Steel Designer's Manual (5th Ed)

missä $m = x/L$ and $n = a/L$

kun x = 1,9 m and a = 1,5 m: m = 1,9/4,2 = 0,452; n = 1,5/4,2 = 0,357

Osittain jatkuva kuorma (pysyvä kuorma+ muuttuva kuorma): w = 11,0 kN/m

Tasan jakaantunut kuorma (pysyvä kuorma): w = 0,128 kN/m

Osittain jatkuvasta kuormasta aiheutuva taipuma 1,9 m:n etäisyydellä tuesta A, δ_1:

$$\delta_1 = \frac{11000 \times 1,5 \times 4200^4}{24 \times 1500 \times 198757,6 \times 9,06 \times 10^6} \times$$
$$0,357^2 \times \left[2 \times 0,452^3 - 6 \times 0,452^2 + 0,452\left(4 + 0,357^2\right) - 0,357^2\right]$$

δ_1 = 7,04 mm

Omapainon aiheuttama taipuma palkin keskellä, δ_2

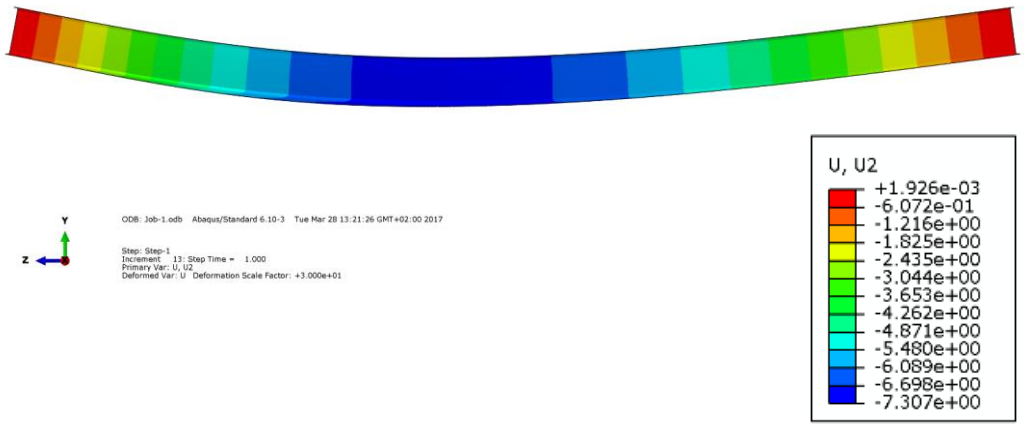
$$\delta_2 = \frac{5}{384} \times \frac{(w \times L) L^3}{E_S I} = \frac{5}{384} \times \frac{(0{,}128 \times 10^3 \times 4{,}2) \times 4200^3}{198\,757{,}6 \times 9{,}06 \times 10^6} = 0{,}29 \text{ mm}$$

Kokonaistaipuma $\approx \delta_1 + \delta_2 = 7{,}04 + 0{,}29 = 7{,}33$ mm

$$\delta_{\text{limiting}} = \frac{L}{250} = \frac{4200}{250} = 16{,}8 \text{ mm} > 7{,}33 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ Taipuma on hyväksyttävissä.

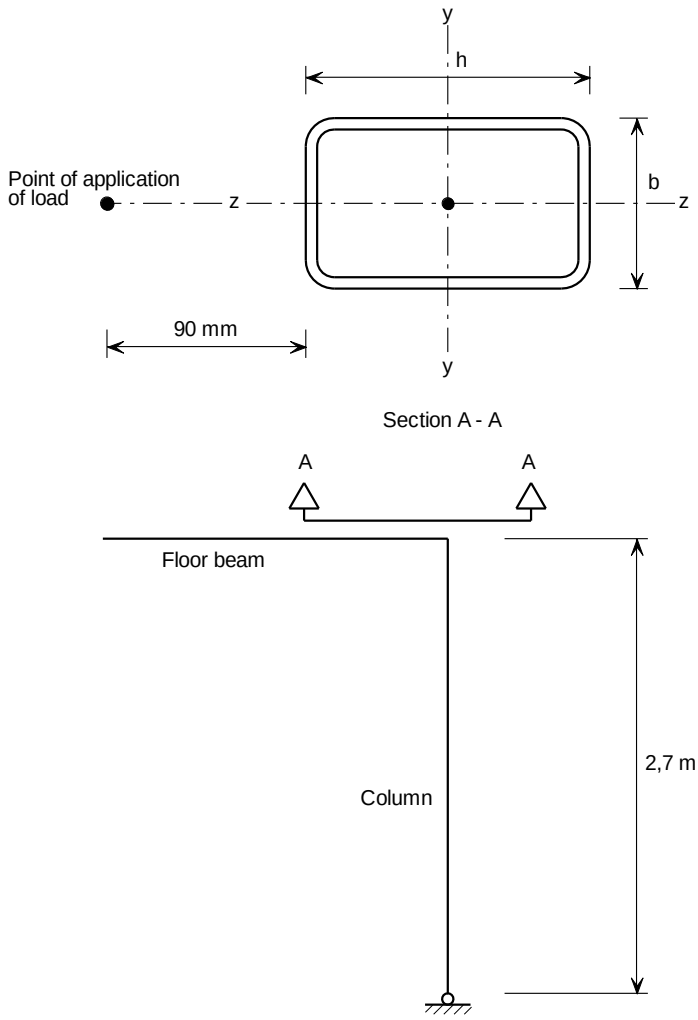
(Mitoitusesimerkin taipuma ratkaistiin myös FE-menetelmällä. Palkin kokonaistaipuma jännevälin keskellä on 7,307 mm – taipuman muoto ja suuruus on esitetty alla olevassa kuvassa.)



MITOITUSESIMERKKI 10 – AKSIAALISESTI KUORMITETUN PILARIN PALOTILANTEEN MITOITUS

Mitoitetaan suojaamaton kylmävalssattu aksiaalivoimalla ja taivutusmomentilla kuormitettu rakenneputki palotilanteessa 30 minuutin palonkestoajalle.

Pilarin korkeus on 2,7 m ja siihen kohdistuu aksiaalivoiman lattiapalkin tukireaktiona 90 mm:n etäisyydellä pilarin kapeammasta sivusta.



Kuormitukset

Epäkeskeisyys on 90 mm + $h/2$, missä h on rakenneputken Poikkileikkauksen korkeus. Siten pilariin kohdistuu taivutusta vahvemman akselin suhteen.

Nimelliset kuormat ovat: Pysyvä kuorma: 6 kN
Muuttuva kuorma: 7 kN

Pilari tarkastellaan murtorajatilassa (LC1) ja sen jälkeen tehdään palotilanteen mitoitus 30 minuutin palonkestoajalle (LC2). Kuormitustapaukset ovat seuraavat:

LC1 (murtorajatila) $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$

$\gamma_{G,j}$ = 1,35 (epäsuotuisa vaikutus)
$\gamma_{Q,1}$ = 1,5

LC2 (Palotilanne) $\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1}$

γ_{GA} = 1,0

Arvot yhdistelykertoimelle $\psi_{1,1}$ annetaan standardissa EN 1990 ja sen kansallisessa liitteessä, mutta tässä esimerkissä käytetään varmalla puolella olevana arvoa $\psi_{1,1}$ = 1,0.

Mitoitus murtorajatilassa (LC1)

Pilarin kuormitus:

Aksiaalinen suunnittelukuorma N_{Ed} = 1,35 × 6 + 1,5 × 7 = 18,6 kN

Kokeillaan 100×50×6 kylmämuovattu rakenneputki.

Taivutusmomentti vahvemman akselin suhteen (johtuen aksiaalikuorman epäkeskeisyydestä):

$M_{y,Ed}$ = 18,6 × (0,09 + 0,10/2) = 2,60 kNm

Osavarmuusluvut

Käytetään seuraavia osavarmuuslukuja: Taul. 4.1

γ_{M0} = 1,10 and γ_{M1} = 1,10

Materiaaliominaisuudet

Austeniittinen teräslaji 1.4401.

f_y = 220 N/mm² ja f_u = 530 N/mm² (kuumavalssatun materiaalin ominaisuudet). Taul. 2.2

E = 200000 N/mm² ja G = 76900 N/mm² Kohta 2.3.1

Poikkileikkaussuureet – 100 x 50 x 6 mm RHS

$W_{el,y}$ = 32,58 × 10³ mm³ i_y = 32,9 mm

$W_{pl,y}$ = 43,75 × 10³ mm³ i_z = 19,1 mm

A = 1500 mm² t = 6,0 mm

Poikkileikkausluokka Kohta 5.3.2

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210000}\right]^{0,5} = \left[\frac{235}{220}\times\frac{200000}{210000}\right]^{0,5} = 1,01$$ Taul. 5.2

Rakenneputkille puristetun sivun leveys c voidaan käyttää $h - 3t$. Taul. 5.2

Uumalle, c = 100 – 3 × 6 = 82 mm

Puristettu uuma: c/t = 82/6 = 13,7 Taul. 5.2

Raja-arvo poikkileikkausluokan 1 uumalle = 33ε = 33,33 Taul. 5.2

33,33 > 13,7 ∴ Uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1

Tässä tapauksissa myös puristettu laippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

$\therefore$ Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1 (Aksiaalinen puristus).

Poikkileikkauksen puristuskestävyys — Kohta 5.7.3

$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. — Kaava 5.27

$N_{c,Rd} = \frac{1500 \times 220}{1,1} = 300$ kN

300 kN > 18,6 kN $\therefore$ Kestävyys on riittävä.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys — Kohta 5.7.4

$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. — Kaava 5.29

$M_{c,y,Rd} = \frac{43750 \times 220}{1,1} = 8,75$ kNm

8,75 kNm > 2,60 kNm $\therefore$ Kestävyys on riittävä.

Poikkileikkauksen aksiaalinen puristus ja taivutus — Kohta 5.7.6

$M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$ — Kaava 5.33

Seuraavaa yksinkertaistusta $M_{N,y,Rd}$ voidaan käyttää nelikulmaisille rakenneputkille: — EN 1993-1-1, kohta 6.2.9.1(5)

$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}\,(1-n)/(1-0,5a_w)$ mutta $M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$

missä

$a_w = \frac{A-2bt}{A}$ $mutta$ $a_w \leq 0,5$

$a_w = \frac{1500 - 2 \times 50 \times 6}{1500} = 0,6$ $mutta$ $a_w \leq 0,5$, siten $a_w = 0,5$

$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{18,6}{300} = 0,062$

$M_{N,y,Rd} = 8,75\left(\frac{1-0.062}{1-0,5 \times 0,5}\right) = 10,94 \leq M_{pl,y,Rd} = 8,75$

$M_{N,y,Rd} = 8,75$ kNm, ja $M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$

Sauvan nurjahdus puristuskuormalla — Kohta 6.3.3

$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. — Kaava 6.2

$\chi = \frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2\right]^{0,5}} \leq 1$ — Kaava 6.4

missä

$\phi = 0,5\left(1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0\right) + \bar{\lambda}^2\right)$ — Kaava 6.5

$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{f_y}{E}}$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. — Kaava 6.6

L_{cr} = pilarin nurjahduspituus, varmalla puolella olevana voidaan käyttää

1,0 × pilarin pituus = 2,7 m

$$\bar{\lambda}_y = \frac{2700}{32,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 0,866$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2700}{19,1} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 1,492$$

Nurjahduskäyrät: vahvempi (y-y) akseli:

Kylmämuovatuille austeniittisille ruostumattomille rakenneputkille taivutusnurjahduksen laskemiseksi parametrit: α = 0,49 ja $\bar{\lambda}_0$ = 0,30 — Taul. 6.1

$$\phi = 0,5 \times \left(1 + 0,49 \times (0,866 - 0,3) + 0,866^2\right) = 1,014$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,014 + \left[1,014^2 - 0,866^2\right]^{0,5}} = 0,649$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,649 \times 1500 \times 220}{1,10} = 194,70 \text{ kN}$$

194,70 kN > 18,6 kN ∴ Kestävyys on riittävä.

Nurjahduskäyrät: heikompi (z-z) akseli:

$$\phi = 0,5 \times \left(1 + 0,49 \times (1,492 - 0,3) + 1,492^2\right) = 1,905$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,905 + \left[1,905^2 - 1,492^2\right]^{0,5}} = 0,324$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,324 \times 1500 \times 220}{1,10} = 97,20 \text{ kN}$$

97,20 kN > 18,6 kN ∴ Kestävyys on riittävä.

(Kestävyys vääntönurjahdukselle ei ole kriittinen nelikulmaisille rakenneputkille, joiden h/*b*-suhde on 2.) — Kohta 6.3.1

Sauvan nurjahduskestävyys taivutukselle ja aksiaaliselle puristukselle — Kohta 6.5.2

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$$ — Kaava 6.56

$\beta_{W,y}$ = 1,0 poikkileikkausluokassa 1

$$k_y = 1,0 + D_1 \left(\bar{\lambda}_y - D_2\right) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 \left(D_3 - D_2\right) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$ — Kaava 6.63

Taulukosta 6.6, D_1 = 2,0 ja D_2 = 0,3 and D_3 = 1,3 — Taul. 6.6

$$k_y = 1,0 + 2 \times (0,866 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,108 \; < 1 + \; 2 \times (1,3 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,191$$

∴ k_y = 1.108

$$\frac{18,6}{97,20} + 1,108 \times \left(\frac{2,60 \times 10^6 + 0}{1,0 \times 43,75 \times 10^3 \times 220 / 1,10} \right) = 0,521 < 1 \therefore \text{ Kestävyys on riittävä.}$$

Palotilanteen mitoitus (LC2)

Kuormitustapauksessa LC2, pilaria kuormittaa aksiaalivoima ja taivutusmomentti seuraavasti:

Aksiaalinen puristusvoima $N_{fi,Ed}$ = 1,0 × 6 + 1,0 × 7 = 13,0 kN

Suurin taivutusmomentti $M_{y,fi,Ed}$ = 13,0 × (0,09 + 0,05) = 1,82 kNm

Määritetään teräksen Lämpötila 30 minuutin palonkestoaikana — Kohta 8.4.4

Oletetaan, että profiili on suojaamaton ja lämpötilajakauma on tasainen pilarissa.
Lämpötilan kohoaminen aika-askeleella Δt voidaan laskea:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c\,\rho} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$ — Kaava 8.41

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$ — Kaava 8.42

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \left(\theta_g - \theta \right)$$ — Kaava 8.43

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \varepsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} \left[\left(\theta_g + 273 \right)^4 - \left(\theta + 273 \right)^4 \right]$$ — Kaava 8.44

missä:

θ_g = pilaria ympäröivän kaasun lämpötila palotilanteessa, joka lasketaan nimellisestä lämpötila-aika kaavasta:

$\theta_g = 20 + 345\log_{10}(8t + 1)$ — Kaava 8.45

θ = pilarin pinnan Lämpötila

Seuraavia alkuarvoja käytetään teräksen loppulämpötilan määrittämiseksi:

A_m/V = 200 m^{-1}

α_c = 25 W/m^{2}K — Kohta 8.4.4

teräksen alkulämpötila: θ = 20 °C

Resultoiva emissiviteetti: ε_{res} = 0,4 — Kohta 8.4.4

Ruostumattoman teräksen tiheys ρ = 8000 kg/m^3 teräslajille 1.4401 — Taul. 2.7

Näkyvyyskerroin: φ = 1,0 — EN 1991-1-2 kohta. 3.1(7)

Ominaislämpö on lämpötilasta riippuva ja se lasketaan kaavalla:

$c = 450 + 0,28\theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3$ J/kgK — Kaava 8.37

Δt = 2 sekuntia

Yllä oleva yhtälö ja annetut alkuarvot syötettiin excel-taulukkoon ohjelmoituun laskentarutiiniin, josta teräksen lämpötilaksi laskettiin 30 minuutin palon jälkeen:

θ = 829 °C

Mekaanisen ominaisuuksien arvojen pienennys palotilanteessa

Seuraavia pienennystekijöitä tarvitaan kestävyyksien laskemiseksi palotilanteessa. — Kohta 8.2

Kimmomodulin pienennystekijä: $k_{E,\theta} = E_\theta/E$ — Kaava 8.4

0,2%-rajan pienennystekijä: $k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta}/f_y$ — Kaava 8.1

2%-rajan pienennystekijä: $k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y$ mutta $f_{2,\theta} \le f_{u,\theta}$ — Kaava 8.2

Pienennystekijöiden arvot lämpötilassa 829 °C on interpoloitu lineaarisesti:

$k_{E,\theta}$ = 0,578 — Taul. 8.1

$k_{p0,2,\theta}$ = 0,355 — Taul. 8.1

$k_{2,\theta}$ = 0,430

$k_{u,\theta}$ = 0,297

$f_{2,\theta}$ = 0,430 × 220 = 94,6 and $f_{u,\theta}$ =0,297 × 530 = 157, ja $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

Osavarmuusluvut — Kohta 8.1

$\gamma_{M,fi}$ = 1,0

Poikkileikkausluokka — Kohta 8.3.2

Puristuksella, $k_{y,\theta}$ määritetään perustuen $fp_{0,2,\theta}$, siten $k_{y,\theta} = k_{p0,2,\theta}$ — Kohta 8.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon\left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}\right]^{0,5} = 1,01\times\left[\frac{0,578}{0,355}\right]^{0,5} = 1,29$$ — Kaava 8.6

Puristettu uuma c/t = 82/6 = 13,7

Raja-arvo poikkileikkausluokan 1 uumalle = 33 ε_θ = 42,57

42,57 > 13,7 ∴ Uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

∴ Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1(Aksiaalinen puristus).

Sauvan nurjahdus puristuskuormalla

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}\, A\, k_{p0,2,\theta}\, f_y}{\gamma_{M,fi}}$$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. — Kaava 8.10

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \left[\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2\right]^{0,5}} \leq 1$$ — Kaava 8.12

where

$$\phi_\theta = 0,5\left(1 + \alpha\left(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0\right) + \bar{\lambda}_\theta^2\right)$$ — Kaava 8.13

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\left[\frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}}\right]^{0,5}$$ kaikille poikkileikkausluokille — Kaava 8.14

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = 0,866\left[\frac{0,355}{0,578}\right]^{0,5} = 0,679$$

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = 1,492\left[\frac{0,355}{0,578}\right]^{0,5} = 1,169$$

Nurjahduskäyrät: vahvempi (y-y) akseli:

Kylmämuovatuille austeniittisille ruostumattomille rakenneputkille taivutusnurjahduksen laskemiseksi parametrit: α = 0,49 ja $\bar{\lambda}_0$ = 0,30. — Taul. 6.1

$$\phi_{\theta,y} = 0,5\times\left(1 + 0,49\times\left(0,679 - 0,3\right) + 0,679^2\right) = 0,823$$

$$\chi_{fi,y} = \frac{1}{0,823 + \left[0,823^2 - 0,679^2\right]^{0,5}} = 0,776$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \frac{0,776 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 90,91 \text{ kN}$$

90,91 kN > 13,0 kN ∴ Kestävyys on riittävä.

Nurjahduskäyrät: heikompi (z-z) akseli:

$$\phi_{\theta,z} = 0,5 \times \left(1 + 0,49 \times (1,169 - 0,3) + 1,169^2\right) = 1,396$$

$$\chi_{fi,z} = \frac{1}{1,396 + \left[1,396^2 - 1,169^2\right]^{0,5}} = 0,463$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \frac{0,463 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 54,24 \text{ kN}$$

54,24 kN > 18,6 kN ∴ Kestävyys on riittävä.

Sauvan nurjahduskestävyys taivutukselle ja aksiaaliselle puristukselle

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1$$ Kaava 8.26

missä

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$ Kaava 8.30

$$\mu_y = \left(1,2\beta_{M,y} - 3\right)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$ Kaava 8.31

Olettamalla pilari nivelellisesti tuetuksi perustukseen, pilarissa vaikuttaa kolmiomainen taivutusmomenttijakauma ja β_M = 1,8: Taul. 8.3

$$\mu_y = (1,2 \times 1,8 - 3) \times 0,679 + 0,44 \times 1,8 - 0,29$$

$$= -0,068$$

$$k_y = 1 - \frac{(-0,068) \times 13,0 \times 10^3}{0,776 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} = 1,010 < 3,0$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}\right)$$ poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3. Kaava 8.15

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = 0,430 \times 8,75 \times \left(\frac{1,10}{1,0}\right) = 4,14 \text{ kNm}$$

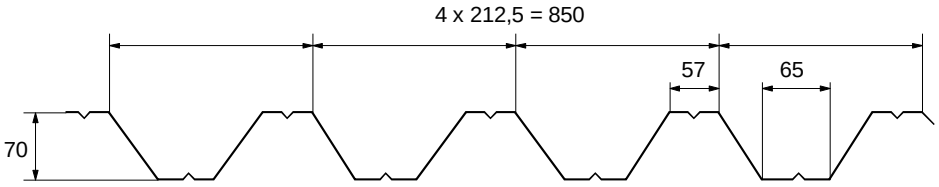
$$\frac{13,0}{0,463 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} + \frac{1,010 \times 1,82}{4,14} = 0,444 \leq 1$$ Kaava 8.26

Pilarilla on riittävä kestävyys 30 minuutin palossa.

MITOITUSESIMERKKI 11 – KAKSIAUKKOISEN MUOTOLEVYKATTEEN MITOITUS

Esimerkissä mitoitetaan kaksiaukkoinen muotolevykate, jonka ainevahvuus on 0,6 ja materiaali on austeniittinen teräslaji 1.4401 CP500, eli kylmämuokattu materiaalin, jonka f_y = 460 N/mm^2. Vertailu tehdään vastaavanlaiseen rakenteeseen, jonka materiaali on ferriittinen teräslaji 1.4003 hehkutetussa tilassa, eli f_y = 280 N/mm^2 (kts. mitoitusesimerkki 3). (Ferriittisen ja austeniittisen teräslajin suunnittelussa ei ole eroavaisuuksia.)

Muotolevykatteen dimensiot on annettu alla.

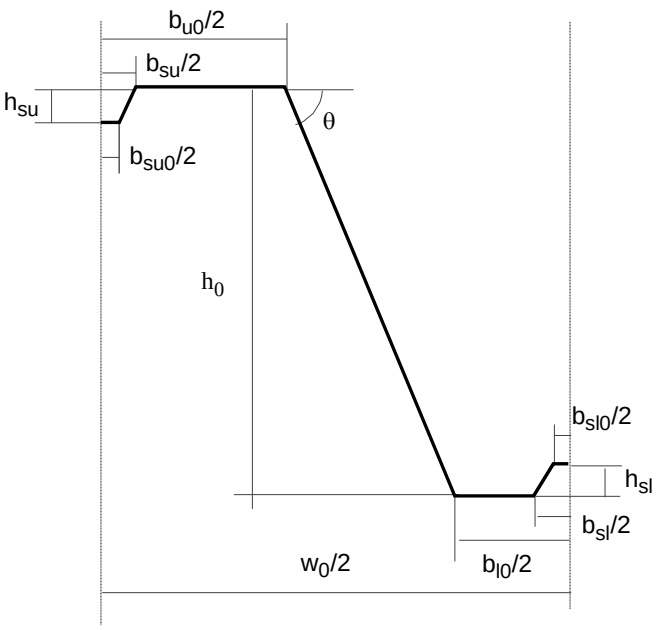


Esimerkissä käydään läpi seuraavat kohdat:
- tehollisten poikkileikkaussuureiden määrittäminen murtotilassa;
- poikkileikkauksen taivutuskestävyyden määrittäminen;
- kestävyyden määrittäminen keskituella;
- käyttörajatilan siirtymien määrittäminen.

Suunnittelun lähtötiedot

Jännevälit	L	=	3500 mm	
Tukien leveys	s_s	=	100 mm	
Suunnittelukuorma	Q	=	1,4 kN/m^2	
Omapaino	G	=	0,07 kN/m^2	
Ainepaksuus	t	=	0,6 mm	
Myötölujuus	f_y	=	460 N/mm^2	Taul. 2.3
Kimmomoduli	E	=	200000 N/mm^2	Kohta 2.3.1
Osavarmuusluku	γ_{M0}	=	1,1	Taul. 4.1
Osavarmuusluku	γ_{M1}	=	1,1	Taul. 4.1
Kuormakerroim	γ_G	=	1,35	Kohta 4.3
Kuormakerroin	γ_Q	=	1,5	Kohta 4.3

Seuraavassa on esitetty yksityiskohtainen piirustus muotolevykatteesta. Ylälaippa on puristuksella keskituella ja tästä syystä tämä tapaus tarkastetaan.



Dimensiot keskiviivalla:

$h_0 = 70$ mm
$w_0 = 212{,}5$ mm
$b_{u0} = 65$ mm
$b_{l0} = 57$ mm
$b_{su} = 20$ mm
$b_{su0} = 8$ mm
$h_{su} = 6$ mm
$b_{sl} = 20$ mm
$b_{s10} = 8$ mm
$h_{sl} = 6$ mm
$r = 2$ mm (nurkan sisäsäde)

Uuman kulma:

$$\theta = \text{atan}\left|\frac{h_0}{0{,}5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})}\right| = \text{atan}\left|\frac{70}{0{,}5 \times (212{,}5 - 65 - 57)}\right| = 57{,}1°$$

Teholliset poikkileikkaussuureet murtorajatilassa (ULS) — Kohta 5.2

Tarkistetaan suurimmat leveys-paksuus-suhteet ja uuman kulma:

$h_0/t = 70/0{,}6 = 117 \leq 400\sin\theta = 336$ — Taul. 5.1

Uuman kulma ja nurkkasäde:
$\max(b_{l0}/t\,;\, b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0{,}6 = 108 \leq 400$ — Taul. 5.1

$45° \leq \theta = 57{,}1° \leq 90°$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22{,}5 \text{ mm}$$

Nurkan pyöristystä ei oteta huomioon poikkileikkauskestävyyden laskennassa, mikäli nurkan sisäsäde $r \leq 5t$ and $r \leq 0{,}10 b_p$

$r = 2\text{mm} \leq \min(5t\,;\, 0{,}1 b_p) = \min(5 \times 0{,}6\,;\, 0{,}1 \times 22{,}5) = 2{,}25$ mm — Kohta 5.6.2

Nurkan pyöristyksen vaikutus poikkileikkauskestävyyteen voidaan jättää huomioon ottamatta.

Painopisteakselin sijainti, kun uuma toimii täysin tehollisena

Lasketaan pienennystekijä ρ puristetun laipan teholliselle leveydelle:

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ but } \leq 1$$ — Kohta 5.4.1 Kaava 5.1

missä

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{22{,}5/0{,}6}{28{,}4 \times 0{,}698 \times \sqrt{4}} = 0{,}946$$ — Kaava 5.3

$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$ — Taul. 5.3

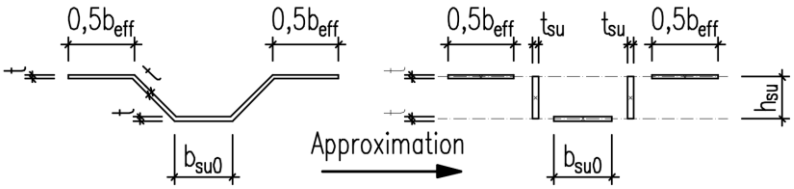
$$\bar{b} = b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22{,}5 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} = \left[\frac{235}{460}\times\frac{200\,000}{210\,000}\right]^{0,5} = 0{,}698$$ Taul. 5.2

$$\rho = \frac{0{,}772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0{,}772}{0{,}946} - \frac{0{,}079}{0{,}946^2} = 0{,}728 \le 1$$

$$b_{eff,u} = \rho\bar{b} = 0{,}728 \times 22{,}5 = 16{,}38 \text{ mm}$$ Taul. 5.3

Jäykisteen teholliset ominaisuudet



$$t_{su} = \frac{\sqrt{h_{su}^{\ 2} + \left(\frac{b_{su} - b_{su0}}{2}\right)^2}}{h_{su}}t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20-8}{2}\right)^2}}{6} \times 0{,}6 = 0{,}849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{eff,u} + b_{su0})t + 2h_{su}t_{su} = (16{,}38 + 8) \times 0{,}6 + 2 \times 6 \times 0{,}849 = 24{,}82 \text{ mm}^2$$ Kuva 5.3

$$e_s = \frac{b_{su0}h_{su}t + 2h_{su}\frac{h_{su}}{2}t_{su}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0{,}6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0{,}849}{24{,}82} = 2{,}39 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^{\ 2}) + b_{su0}t\,(h_{su} - e_s)^2 + 2h_{su}t_{su}\left(\frac{h_{su}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{su0}t^3}{12} + 2\frac{t_{su}h_{su}^{\ 3}}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0{,}6^2 \times 2{,}39^2) + 8 \times 0{,}6 \times (6 - 2.39)^2 + 2 \times 6 \times 0{,}849 \times \left(\frac{6}{2} - 2{,}39\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0{,}6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0{,}6^3}{12} + 2 \times \frac{0{,}849 \times 6^3}{12} = 159{,}07 \text{ mm}^4$$ Kuva 5.3

$$b_s = 2\sqrt{h_{su}^{\ 2} + \left(\frac{b_{su} - b_{su0}}{2}\right)^2} + b_{su0} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20-8}{2}\right)^2} + 8 = 25{,}0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3{,}07\left[I_s b_p^{\ 2}\left(\frac{2b_p + 3b_s}{t^3}\right)\right]^{1/4} = 3{,}07 \times \left[159{,}07 \times 22{,}5^2 \times \left(\frac{2 \times 22{,}5 + 3 \times 25}{0{,}6^3}\right)\right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$ Kaava 5.10

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^{\ 2}} = \sqrt{\left(\frac{212{,}5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83{,}4 \text{ mm}$$ Kuva 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22{,}5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0{,}5b_d}} = \sqrt{\frac{83{,}4 + 2 \times 70}{83{,}4 + 0{,}5 \times 70}} = 1{,}37$$ Kaava 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83{,}4} = 3{,}01 \ge 2 \quad \Rightarrow \quad k_w = k_{w0} = 1{,}37$$ Kaava 5.8

$$\sigma_{\mathrm{cr,s}} = \frac{4{,}2k_{\mathrm{w}}E}{A_{\mathrm{s}}}\sqrt{\frac{I_{\mathrm{s}}t^3}{4{b_{\mathrm{p}}}^2(2b_{\mathrm{p}}+3b_{\mathrm{s}})}}$$ Kaava 5.4

$$\sigma_{\mathrm{cr,s}} = \frac{4{,}2\times 1{,}37\times 200\times 10^3}{24{,}82}\times\sqrt{\frac{159{,}07\times 0{,}6^3}{4\times 22{,}5^2\times(2\times 22{,}5+3\times 25)}} = 551{,}3\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} = \sqrt{\frac{f_{\mathrm{y}}}{\sigma_{\mathrm{cr,s}}}} = \sqrt{\frac{460}{551{,}3}} = 0{,}913$$

$0{,}65 < \bar{\lambda}_{\mathrm{d}} = 0{,}913 < 1{,}38 \Rightarrow$ Kaava 5.17

$\chi_{\mathrm{d}} = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_{\mathrm{d}} = 1{,}47 - 0{,}723\times 0{,}913 = 0{,}81$

$t_{\mathrm{red,u}} = \chi_{\mathrm{d}}\, t = 0{,}81\times 0{,}6 = 0{,}486$ mm

Neutraaliakselin paikka puristetusta laipasta:

$$t_{\mathrm{sl}} = \frac{\sqrt{{h_{\mathrm{sl}}}^2+\left(\frac{b_{\mathrm{sl}}-b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{\mathrm{sl}}}\,t = \frac{\sqrt{6^2+\left(\frac{20-8}{2}\right)^2}}{6}\times 0{,}6 = 0{,}849\ \mathrm{mm}$$

$t_{\mathrm{w}} = t/\sin\theta = 0{,}6/\sin(57{,}1°) = 0{,}714$ mm

e_i [mm]	A_i [mm^2]
0	$0{,}5b_{\mathrm{eff,u}}\, t = 4{,}9$
0	$0{,}5b_{\mathrm{eff,u}}\, \chi_d\, t = 3{,}98$
$0{,}5h_{\mathrm{su}} = 3$	$h_{\mathrm{su}}\, \chi_d t_{\mathrm{su}} = 4{,}13$
$h_{\mathrm{su}} = 6$	$0{,}5b_{\mathrm{su0}}\, \chi_d\, t = 1{,}94$
$0{,}5h_0 = 35$	$h_0 t_{\mathrm{w}} = 49{,}98$
$h_0 = 70$	$0{,}5(b_{l0}-b_{sl})\, t = 11{,}1$
$h_0 - 0{,}5h_{sl} = 67$	$h_{sl}t_{sl} = 5{,}09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0{,}5b_{sl0}t = 2{,}4$

$$A_{\mathrm{tot}} = \sum A_i = 83{,}52\ \mathrm{mm^2}$$

$$e_{\mathrm{c}} = \frac{\sum A_i e_i}{A_{\mathrm{tot}}} = 36{,}46\ \mathrm{mm}$$

Uuman puristetun alueen tehollinen leveys

$$s_{\mathrm{eff,1}} = s_{\mathrm{eff,0}} = 0{,}76t\sqrt{\frac{E}{\gamma_{\mathrm{M0}}\sigma_{\mathrm{com,Ed}}}} = 0{,}76\times 0{,}6\times\sqrt{\frac{200}{1{,}1\times 460\times 10^{-3}}}$$ EN 1993-1-3 5.5.3.4.3(4-5)

$= 9{,}07$ mm

$s_{\mathrm{eff,n}} = 1{,}5s_{\mathrm{eff,0}} = 1{,}5\times 9{,}07 = 13{,}61$ mm

Tehollinen poikkileikkaus (poimun puolikas)

$h_{\mathrm{eff,1}} = s_{\mathrm{eff,1}}\sin\theta = 9{,}07\times\sin(57{,}1°) = 7{,}62$ mm

$h_{\mathrm{eff},n} = s_{\mathrm{eff},n}\sin\theta = 13{,}61\times\sin(57{,}1°) = 11{,}43$ mm

$e_{\mathrm{eff},i}$ [mm]	$A_{\mathrm{eff},i}$[mm^2]	$I_{\mathrm{eff},i}$[mm^4]
0	$0{,}5b_{\mathrm{eff,u}}t = 4{,}9$	≈ 0
0	$0{,}5b_{\mathrm{eff,u}}\,\chi_d\,t = 4{,}0$	≈ 0
$0{,}5h_{\mathrm{su}} = 3$	$h_{\mathrm{su}}\,\chi_d\,t_{\mathrm{su}} = 4{,}1$	$\chi_d t_{\mathrm{su}} {h_{\mathrm{su}}}^3/12 = 12{,}4$
$h_{\mathrm{su}} = 6$	$0{,}5b_{\mathrm{su0}}\,\chi_d\,t = 1{,}9$	≈ 0
$0{,}5h_{\mathrm{eff,1}} = 3{,}8$	$h_{\mathrm{eff,1}}t_{\mathrm{w}} = 5{,}4$	$t_{\mathrm{w}}{h_{\mathrm{eff,1}}}^3/12 = 26{,}3$
$h_0 - 0{,}5(h_0 - e_{\mathrm{c}} + h_{\mathrm{eff},n}) = 47{,}5$	$(h_0 - e_{\mathrm{c}} + h_{\mathrm{eff},n})\,t_w = = 32{,}1$	$t_{\mathrm{w}}\dfrac{(h_0 - e_{\mathrm{c}} + h_{\mathrm{eff},n})^3}{12} = 5411{,}1$
$h_0 = 70$	$0{,}5(b_{l0} - b_{sl})\,t = 11{,}1$	≈ 0
$h_0 - 0{,}5h_{\mathrm{sl}} = 67$	$h_{\mathrm{sl}}t_{\mathrm{sl}} = 5{,}1$	$t_{\mathrm{sl}}{h_{\mathrm{sl}}}^3/12 = 15{,}3$
$h_0 - h_{\mathrm{sl}} = 64$	$0{,}5b_{\mathrm{sl0}}t = 2{,}4$	≈ 0

$A_{\mathrm{tot}} = \sum A_{\mathrm{eff,i}} = 71{,}0\ \mathrm{mm}^2$

$$e_{\mathrm{c}} = \frac{\sum A_{\mathrm{eff,i}}\,e_{\mathrm{eff,i}}}{A_{\mathrm{tot}}} = 40{,}0\ \mathrm{mm}$$

$$I_{\mathrm{tot}} = \sum I_{\mathrm{eff,i}} + \sum A_{\mathrm{eff,i}}(e_{\mathrm{c}} - \mathrm{e}_{\mathrm{eff,i}})^2 = 5\,465{,}1 + 46\,021{,}6 = 51\,486{,}7\ \mathrm{mm}^2$$

Vaihtoehtoisesti tehollinen poikkileikkaus voidaan laskea tarkemmin iteroimalla tehollisen poikkileikkauksen painopisteen sijainti. — EN 1993-1-3

Taivutuskestävyys metriä kohti

$$I = \frac{1000}{0{,}5\mathrm{w}_0}I_{\mathrm{tot}} = \frac{1000}{0{,}5 \times 212{,}5} \times 51\,486{,}7 = 484\,580{,}7\ \mathrm{mm}^4$$

$$W_{\mathrm{u}} = \frac{I}{e_{\mathrm{c}}} = \frac{484\,580{,}7}{40} = 12\,114{,}5\ \mathrm{mm}^3$$

$$W_{\mathrm{l}} = \frac{I}{h_0 - e_{\mathrm{c}}} = \frac{484\,580{,}7}{70 - 40} = 16\,152{,}7\ \mathrm{mm}^3$$

Koska $W_{\mathrm{u}} < W_{\mathrm{l}} \Rightarrow W_{\mathrm{eff,min}} = W_u = 12\,114{,}5\ \mathrm{mm}^3$

$$M_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{W_{\mathrm{eff,min}}f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = 12114{,}5 \times 460 \times \frac{10^{-6}}{1{,}1} = 5{,}07\ \mathrm{kNm}$$ — Kaava 5.31

Kestävyysvälituella — Kohta 6.4.4

Uuman lommahdus

$c \geq 40$ mm — EN 1993-1-3

$r/t = 2/0{,}6 = 3{,}33 \leq 10$ — Kohta 6.1.7

$h_w/t = 70/0{,}6 = 117 \leq 200\sin\theta = 200\sin(57{,}1°) = 168$

$45° \leq \theta = 57{,}1° \leq 90°$

$\beta_{\mathrm{V}} = 0 \leq 0{,}2 \Rightarrow l_a = s_s = 100$ mm

$\alpha = 0{,}15$ (luokka 2)

EN 1993-1-3 Kaava 6.18

$$R_{\mathrm{w,Rd}} = \alpha\, t^2 \sqrt{f_{\mathrm{y}} E}\left(1 - 0{,}1\sqrt{\frac{r}{t}}\right)\left(0{,}5 + \sqrt{0{,}02\frac{l_{\mathrm{a}}}{t}}\right)\left[2{,}4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right]\frac{1}{\gamma_{\mathrm{M1}}}\;\frac{1000}{0{,}5\mathrm{w}_0}$$

$$R_{\mathrm{w,Rd}} = 0{,}15 \times\ 0{,}6^2\sqrt{460 \times 200\,000} \times \left(1 - 0{,}1\sqrt{\frac{2}{0{,}6}}\right)\left(0{,}5 + \sqrt{0{,}02 \times \frac{100}{0{,}6}}\right) \times$$

$$\times \left[2{,}4 + \left(\frac{57{,}1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1{,}1} \times \frac{1000}{0{,}5 \times 212{,}5} \times 10^{-3} = 23{,}6\ \mathrm{kN}$$

Yhdistetty tukireaktio- ja taivutuskestävyys

Mitoituskuorma murtorajatilassa metriä kohti:

$$q = \gamma_{\mathrm{G}} G + \gamma_{\mathrm{Q}} Q\ =\ 1{,}35 \times 0{,}07 + 1{,}5 \times 1{,}4 =\ \ 2{,}19\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{\mathrm{Ed}} =\ \frac{qL^2}{8}\ = \frac{2{,}19 \times 3{,}5^2}{8}\ =\ 3{,}35\ \mathrm{kNm}$$

$$F_{\mathrm{Ed}}\ =\ \frac{5}{4}qL\ =\ \frac{5}{4} \times 2{,}19 \times 3{,}5 =\ 9{,}58\ \mathrm{kN}$$

$$\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{c,Rd}}}\ =\ \frac{3{,}35}{5{,}07}\ =\ 0{,}661 \le 1{,}0 \qquad \frac{F_{\mathrm{Ed}}}{R_{\mathrm{w,Rd}}}\ =\ \frac{9{,}58}{23{,}6}\ = 0{,}406 \le 1{,}0$$

EN 1993-1-3 Kaava 6.28a - c

$$\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{c,Rd}}} + \frac{F_{\mathrm{Ed}}}{R_{\mathrm{w,Rd}}}\ = 0{,}661 + 0{,}406\ =\ 1{,}067 \le 1{,}25$$

Poikkileikkauskestävyys täyttää asetetut ehdot

Taipumien määrittäminen käyttörajatilassa

Tehollinen poikkileikkaus

Puristettujen taso-osien tehollinen leveys lasketaan käyttörajatilan mukaisen puristusjännityksen perusteella.

EN 1993-1-3 Kohta 5.5.1

Varmalla puolella oleva arvo saadaan edellä murtorajatilan mukaan lasketun W_{u} -arvon perusteella.

$$M_{\mathrm{y,Ed,ser}} =\ \frac{(G+Q)L^2}{8}\ =\ \frac{(0{,}07 + 1{,}4) \times 3{,}5^2}{8} =\ \ 2{,}25\ \mathrm{kNm}$$

$$\sigma_{\mathrm{com,Ed,ser}} =\ \frac{M_{\mathrm{y,Ed,ser}}}{W_u}\ =\ \frac{2{,}25 \times 10^6}{12114{,}5}\ =\ \ 185{,}7\ \mathrm{N/mm^2}$$

Tehollinen poikkileikkaus lasketaan kuten edellä murtorajatilassa paitsi, että f_{y} -arvo korvataan arvolla $\sigma_{\mathrm{com,\ Ed,ser}}$ ja laippajäykisteen paksuutta ei redusoida. Laskelmien tulokset ovat:

Puristuslaipan tehollinen leveys:	Puristuslaippa on täysin tehollinen
Painopisteakselin sijainti, kun uuma on täysin tehollinen	e_{c} = 34,1 mm
Puristetun uuman tehollinen leveys	Uuma on täysin tehollinen
Puristetun uuman tehollinen leveys	$s_{\mathrm{eff,1}} = 14{,}268\,\mathrm{mm}$ $s_{\mathrm{eff,\ n}} = 21{,}4\,\mathrm{mm}$
Tehollinen poikkileikkaus (poimun puolikas):	A_{tot} = 82,44 mm^2 e_{c} = 36,25 mm I_{tot} = 59726,1 mm^4

Tehollinen poikkileikkaus metriä kohti

I = 562128,0 mm^4
W_u = 15507,0 mm^4
W_l = 16655,6 mm^4

Taipuman määrittäminen

Sekanttimoduli, joka vastaa taivutusmomentin suurinta arvoa:

$$\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}} = \frac{M_{\mathrm{y,Ed,ser}}}{W_{\mathrm{u}}} = \frac{2{,}25 \times 10^6}{15\,507} = 145{,}096 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}} = \frac{M_{\mathrm{y,Ed,ser}}}{W_{\mathrm{l}}} = \frac{2{,}25 \times 10^6}{16\,655{,}6} = 135{,}090 \text{ N/mm}^2$$

$n = 7$ (austeniittiselle ruostumattomalle teräslajille 1.4401) — Taul. 6.4

$$E_{\mathrm{S},1} = \frac{E}{1 + 0{,}002\dfrac{E}{\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}}}\left(\dfrac{\sigma_{1,\mathrm{Ed,ser}}}{f_{\mathrm{y}}}\right)^n} = \frac{200}{1 + 0{,}002 \times \dfrac{200}{0{,}145}\left(\dfrac{0{,}145}{0{,}460}\right)^7} = 199{,}83 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.53

$$E_{\mathrm{S},2} = \frac{E}{1 + 0{,}002\dfrac{E}{\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}}}\left(\dfrac{\sigma_{2,\mathrm{Ed,ser}}}{f_{\mathrm{y}}}\right)^n} = \frac{200}{1 + 0{,}002 \times \dfrac{200}{0{,}135}\left(\dfrac{0{,}135}{0{,}460}\right)^7} = 199{,}89 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.53

$$E_{\mathrm{S}} = \frac{E_{\mathrm{S},1} + E_{\mathrm{S},2}}{2} = \frac{199{,}83 + 199{,}89}{2} = 199{,}86 \text{ kN/mm}^2$$ — Kaava 6.52

Taipuman tarkistus:

Yksinkertaistuksena sekanttimodulin $E_{\mathrm{s,ser}}$ arvon vaihtelujännevälillä jätetään huomioon ottamatta varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena.

Muotolevyn jäykkyyden laskemiseksi pyöristetyn nurkkasäteen vaikutus otetaan huomioon. Likimääräisesti voidaan laskea seuraavasti:

$$\delta = 0{,}43\,\frac{\sum_{j=1}^{n} r_{\mathrm{j}}\dfrac{\varphi_{\mathrm{j}}}{90^{\mathrm{o}}}}{\sum_{i=1}^{m} b_{\mathrm{p,i}}} = 0{,}43\,\frac{2 \times \dfrac{294{,}2^{\mathrm{o}}}{90^{\mathrm{o}}}}{149{,}3} = 0{,}019$$ — Kaava 5.22

$$I_{\mathrm{y,r}} = I\,(1 - 2\delta) = 562128{,}0\,(1 - 2 \times 0{,}019) = 540767{,}1 \text{ mm}^4$$ — Kaava 5.20

Suurimman taipuman sijainti:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 3{,}5 = 1{,}48 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48 E_{\mathrm{S}} I_{\mathrm{y,r}}}\left(\frac{x}{L} - 3\frac{x^3}{L^3} + 2\frac{x^4}{L^4}\right)$$

$$\delta = \frac{(0{,}07 + 1{,}4) \times 10^3 \times 3{,}5^4}{48 \times 199{,}86 \times 10^6 \times 540767{,}1 \times 10^{-12}} \times \left(\frac{1{,}48}{3{,}5} - 3 \times \frac{1{,}48^3}{3{,}5^3} + 2 \times \frac{1{,}48^4}{3{,}5^4}\right)$$

$$\delta = 11{,}1 \text{ mm}$$

Sallittu taipuma on $L/200$ = 3500/200 = 17,5 mm > 11,1 mm, joten määritetty taipuma on hyväksyttävissä.

Vertailu muotolevykatteen materiaalien, hehkutetun tilan materiaali ja kylmämuokatun tilan materiaali, välillä

Taivutuskestävyys/pituus ja pistevoimakestävyys vertailu hehkutetun tilan materiaalin (f_y = 280 N/mm^2 ja kylmämuokatun tilan materiaalin (f_y = 460 N/mm^2) on esitetty alla:

f_y = 280 N/mm^2 (Mitoitusesimerkki3) $M_{c,Rd}$ = 3,84 kNm ja $R_{w,Rd}$ = 18,4 kN

f_y = 460 N/mm^2 (Mitoitusesimerkki11) $M_{c,Rd}$ = 5,07 kNm ja $R_{w,Rd}$ = 23,6 kN

Muotolevykatteen, joka valmistettu hehkutetun tilan materiaalista, jänneväliä täytyy pienentää 2,9 m:iin verrattuna kylmämuokatusta materiaalista valmistetun 3,5 m. Siten, kylmämuokatusta materiaalista valmistetun muotolevykatteen jänneväliä voidaan kasvattaa, joka tarkoittaa sekundääripalkkien tai orsien määrän vähentämistä ja siten myös pienempiä materiaalikustannuksia.

MITOITUSESIMERKKI 12 – REUNAJÄYKISTETYN U-PROFIILIN MITOITUS TAIVUTUKSELLE

Mitoitetaan reunajäykistetty U-profiili, jonka puristuslaippa ei ole tuettu, taivutuskuormalle. U-profiilin materiaalina on austeniittinen teräslaji 1.4401 kylmämuokatussa tilassa CP500. Palkki on päistään nivelellisesti tuettu, jänneväli l = 4,0 m. Palkkien välinen etäisyys on 1,0 m.

Koska kuormitus ei välity U-profiilin leikkauskeskiön kautta, on tarpeellista tarkistaa sauvan vääntökestävyyden ja kiepahduskestävyyden yhteisvaikutus. Tässä esimerkissä kuitenkin tarkastetaan ainoastaan kiepahduskestävyys.

Osavarmuusluvut

Osavarmuusluvut γ_{M0} = 1,1 ja γ_{M1} = 1,1 — Taul. 4.1

Kuormakerroin γ_G = 1,35 (pysyvät kuormat) ja γ_Q = 1,5 (muuttuvat kuormat) — EN 1991

Kuormat

Pysyvät kuormat (G): 2 kN/m^2

Muuttuvat kuormat (Q): 3 kN/m^2

Koska etäisyys viereisiin palkkeihin on 1m,

G_k = 2 kN/m

Q_k = 3 kN/m

Kuormitustapaus mitoitetaan murtorajatilassa:

$$q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7{,}2 \text{ kN/m}$$

EN 1991

Rakenneanalyysi

Tukireaktiot (leikkausvoiman mitoitusarvo)

$$V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14{,}4 \text{ kN}$$

Taivutusmomentin mitoitusarvo

$$M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14{,}4 \text{ kNm}$$

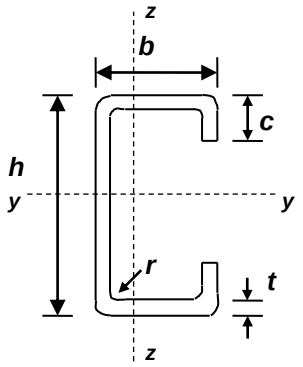
Materiaaliominaisuudet

f_y = 460 N/mm^2 — Taul. 2.3

Kimmomoduli E = 200000 N/mm^2 ja leikkausmoduli G = 76900 N/mm^2 — Kohta 2.3.1

Poikkileikkaussuureet

Nurkan pyöristystä ei oteta poikkileikkauskestävyyden laskennassa, mikäli nurkan sisäsäde $r \leq 5t$ ja $r \leq 0{,}10b_p$ ja poikkileikkauksen oletetaan koostuvan terävänurkkaisista taso-osista. Poikkileikkauksen jäykkyyden laskennassa nurkkapyöristysten vaikutus otetaan aina huomioon. — Kohta 5.6.2



h = 160 mm
b = 125 mm
c = 30 mm
t = 5 mm
r = 5 mm

$r_{\mathrm{m}} = r + t/2 = 7{,}5\ \mathrm{mm}$

$g_{\mathrm{r}} = r_{\mathrm{m}}\left[\tan(\varphi/2) - \sin(\varphi/2)\right] = 2{,}2\ \mathrm{mm}$

$b_{\mathrm{p}} = b - t - 2g_{\mathrm{r}} = 115{,}6\ \mathrm{mm}$ Kuva 5.5

$r = 5\ \mathrm{mm} \le 5t = 25\ \mathrm{mm}$

$r = 5\ \mathrm{mm} \le 0{,}10 b_{\mathrm{p}} = 11{,}56\ \mathrm{mm}$

Nurkkapyöristysten vaikutus voidaan riittävällä tarkkuudella huomioon seuraavalla yksinkertaistuksella:

Laipan käsitteellinen leveys, $b_{\mathrm{p,f}} = b - t - 2g_{\mathrm{r}} = 115{,}6\ \mathrm{mm}$

Uuman käsitteellinen korkeus, $b_{\mathrm{p,w}} = h - t - 2g_{\mathrm{r}} = 150{,}6\ \mathrm{mm}$

Reunajäykisteen käsitteellinen leveys, $b_{\mathrm{p,l}} = c - t/2 - g_{\mathrm{r}} = 25{,}3\ \mathrm{mm}$

$A_{\mathrm{g,sh}} = t\left[2b_{\mathrm{p,f}} + b_{\mathrm{p,w}} + 2b_{\mathrm{p,l}}\right] = 2162\ \mathrm{mm}^2$

$$I_{\mathrm{yg,sh}} = 2\times\left[\frac{1}{12}b_{\mathrm{p,f}}t^3 + b_{\mathrm{p,f}}t(0{,}5h - 0{,}5t)^2\right] + 2\times\left[\frac{1}{12}b_{\mathrm{p,l}}^3 t + b_{\mathrm{p,l}}t\left(0{,}5h - (c - b_{\mathrm{p,l}}) - 0{,}5b_{\mathrm{p,l}}\right)^2\right] +$$

$$+\frac{1}{12}b_{\mathrm{p,w}}^3 t = 9{,}376\times10^6\ \mathrm{mm}^4$$

$$\delta = 0{,}43\sum_{j=1}^{n} r_{\mathrm{j}}\frac{\varphi_{\mathrm{j}}}{90^o} \Big/ \sum_{i=1}^{m} b_{\mathrm{p,i}} = 0{,}02$$ Kaava 5.22

$A_{\mathrm{g}} = A_{\mathrm{g,sh}}(1 - \delta) = 2119\ \mathrm{mm}^2$ Kaava 5.19

$I_{\mathrm{g}} = I_{\mathrm{g,sh}}(1 - 2\delta) = 9{,}0\times10^6\ \mathrm{mm}^4$ Kaava 5.20

Poikkileikkausluokitus Kohta 5.3

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210000}\right]^{0{,}5} = 0{,}698$$ Taul. 5.2

Laippa: Molemmilta reunoiltaan tuettu puristettu taso-osa.

$c = b_{\mathrm{p,f}} = 115{,}6\ \mathrm{mm}$ ja c/t = 23,12

Poikkileikkausluokassa 2, $c/t \le 35\varepsilon = 24{,}43$, laipat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 2.

Uuma: Molemmilta reunoiltaan tuettu taso-osa. Taso-osa on taivutuksella kuormitettu.

$c = b_{\mathrm{p,w}}$ = 150,6 mm ja c/t = 30,12

Poikkileikkausluokassa 1, $c/t \le 72\varepsilon = 50{,}26$, uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Reunajäykiste: Yhdeltä reunaltaan tuettu taso-osa. Taso-osa on puristuksella kuormitettu.

$c = b_{p,l} = 25{,}30$ mm ja c/t = 5,06

Poikkileikkausluokassa 1, $c/t \leq 9\varepsilon =$ 6,28, reunataite kuuluu poikkileikkausluokkaan 1

Leikkausviive — Kohta 5.4.2

Leikkausviive laipoissa voidaan jättää huomioon ottamatta, jos $b_0 < L_e/50$, missä b_0 on puolet molemmilta reunoiltaan tuetun laipan leveydestä, ja L_e on taivutusmomentin 0-kohtien välinen pituus.

Molemmilta reunoiltaan tuetulle taso-osalle: $b_o = (b - t)/2$ = 60 mm

Momentin 0-kohtien välinen pituus: L_e = 4000 mm, Le /50 = 80 mm

Leikkausviive voidaan jättää huomioon ottamatta.

Laipan kaareutuminen — Kohta 5.4.3

Laipan kaareutuminen voidaan jättää huomioon ottamatta, jos kaareutuminen, u, neutraali-akselia kohden on vähemmän kuin 5% poikkileikkauksen korkeudesta:

$$u = 2\frac{\sigma_a^2}{E^2}\frac{b_s^4}{t^2\, z}$$

EN 1993-1-3, Kohta 5.4 Kaava 5.3a

σ_a on keskimääräinen jännitys laipoissa laskettuna bruttopoikkileikkaussuureilla (f_y=460 N/mm^2 on oletusarvo)

$b_s = b_{p,f} + b_{p,l}$ = 140,9 mm — EN 1993-1-3

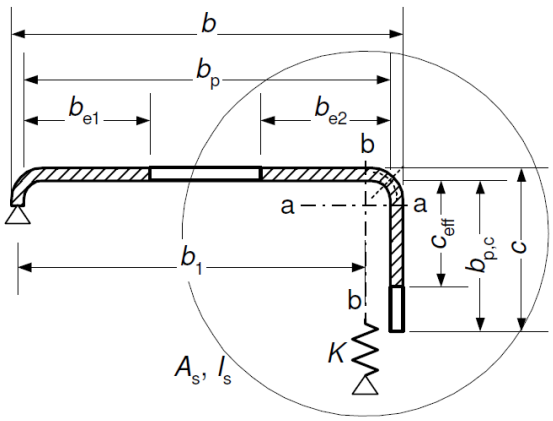
t = 5 mm — Kuva 5.3

z = on tutkittavan laipan etäisyys neutraali-akselista = 77,5 mm

u = 2,15 mm < 0,05h = 8 mm, joten laipan kaareutuminen voidaan jäättä huomioon ottamatta.

Jäykistetyt taso-osat. Reunajäykisteet

Vinoutumisnurjahdus. Taso-osat, joissa reunajäykisteet — Kohta 5.5.1 ja EN 1993-1-3, Kohta 5.5.3



$b/t \leq 60$
a) single edge fold

Step 1: Reunajäykisteen Poikkileikkauksen alustava tehollinen poikkileikkaus — EN 1993-1-3, Kohta 5.5.3.2

Laipoille (kuten aiemmin laskettu)

b =125 mm ja $b_p = b_{p,f}$ = 115,6 mm

Reunajäykisteelle, Tehollinen leveys c_{eff} lasketaan käyttäen kyseeseen tulevaa lommahdustekijää k_σ, $\bar{\lambda}_p$ ja ρ yhtälöitä seuraavasti:

$b_{p,c} = b_{p,l} = 25{,}30$ mm

$b_{p,c}/b_p = 0{,}22 < 0{,}35$ siten $k_\sigma = 0{,}5$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.13b

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0{,}36 \qquad (\bar{b} = 25{,}3\,\text{mm})$$ — Kaava 5.3

Kylmämuovatuille molemmilta reunoilta tuettu taso-osa:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0{,}188}{\bar{\lambda}_p^2} = 1{,}33 > 1$$ siten □ = 1,0 — Kaava 5.2

$c_{eff} = \rho b_{p,c} = 25{,}30$ mm — EN 1993-1-3, Kaava 5.13a

Step 2: Pienennystekijä vinoutumisnurjahdukselle

Reunajäykisteen geometristen ominaisuuksien laskenta

$b_{e2} = b_{p,f} = 115{,}6$ mm

Tässä esimerkissä, koska puristettu laippa on poikkileikkausluokkaa 2, b_{e2} käsittää koko laipan ja siksi hyväksytään $b_{e1} = 0$.

$c_{eff} = b_{p,l} = 25{,}30$ mm

$A_s = (b_{e2} + c_{eff})t = (b_{b,f} + b_{b,l}) \times t = 704{,}5$ mm^2

Lineaarisen jousivakion määrittäminen

$$K_1 = \frac{Et^3}{4\left(1-\upsilon^2\right)}\left(\frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0{,}5 b_1 b_2 h_w k_f}\right) = 6{,}4 \text{ N/mm}^2$$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.10b

$b_1 = b - y_b - t/2 - r = 71{,}1$ mm (etäisyys uuman ja laipan leikkauspisteestä reunajäykisteen tehollisen alan, joka sisältää laipan tehollisen osan b_{e2}, painopisteeseen).

$k_f = 0$ (laippa 2 on vedolla)

$h_w = h - 2t - 2r = 160 - 2\times5 - 2\times5 = 140$ mm

Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahdusjännitys teholliselle reunajäykisteelle, valitaan $K=K_1$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 565{,}8 \text{ N/mm}^2$$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.15

Pienennystekijä χ_d vinoutumisnurjahdukselle

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}} = 0{,}90$$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.12d

$0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38$ siten $\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_d = 0{,}82$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.12b

Tehollisen jäykisteen redusoitu pinta-ala ja ainepaksuus, ottaen huomioon että $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 576{,}4 \text{ mm}^2$$ — EN 1993-1-3, Kaava 5.17

$t_{red} = tA_{s,red}/A_s = 4{,}1$ mm

Tehollisten poikkileikkaussuureiden laskenta ottaen huomioon vinoutumisnurjahdus

$$A_{g,sh} = t\left[b_{p,f} + b_{p,w} + b_{p,l}\right] + t_{red}\left[b_{p,f} + b_{p,l}\right] = 2034{,}0 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 0{,}43\sum_{j=1}^{n} r_j \frac{\varphi_j}{90^o} \Big/ \sum_{i=1}^{m} b_{p,i} = 0{,}02$$ — Kaava 5.22

$A_g = A_{g,sh}(1-\delta) = 1993{,}3\ \text{mm}^2$ — Kaava 5.19

Uusi e_{eff}, etäisyys uuman keskipisteestä, positiivinen suunta alaspäin:

$$e_{eff} = \frac{-b_{p,f}t_{red}\left(0{,}5h-0{,}5t_{red}\right)+b_{p,f}t\left(0{,}5h-0{,}5t\right)-b_{p,l}t_{red}\left(0{,}5h-0{,}5t-g_r-0{,}5b_{p,l}\right)}{A_{g,sh}}$$

$$+\frac{b_{p,l}t\left(0{,}5h-0{,}5t-g_r-0{,}5b_{p,l}\right)+b_{p,l}0}{A_{g,sh}} = 4{,}7\ \text{mm}$$

$I_{y,g,sh}=$

$$\frac{1}{12}b_{p,f}t_{tred}^3+b_{p,f}t_{red}(0{,}5h-0{,}5t_{red}+e_{eff})^2+\frac{1}{12}b_{p,l}^3t_{red}+b_{p,l}t_{red}\left(0{,}5h-0{,}5t-g_r-0{,}5b_{p,l}+e_{eff}\right)^2$$

$$+\frac{1}{12}b_{p,f}t^3+b_{p,f}t(0{,}5h-0{,}5t-e_{eff})^2+\frac{1}{12}b_{p,l}^3t+b_{p,l}t\left(0{,}5h-0{,}5t-g_r-0{,}5b_{p,l}-e_{eff}\right)^2$$

$$+\frac{1}{12}b_{p,w}^3t+b_{p,w}t(e_{eff})^2 = 8{,}64\times10^6\,\text{mm}^4$$

$I_{y,g} = I_{y,g,sh}(1-2\delta) = 8{,}297\times10^6\ \text{mm}^4$ — Kaava 5.20

$z_{max} = h/2 + e_{eff} = 160/2 + 4{,}7 = 84{,}7$ mm (etäisyys äärimmäiseen reunaan neutraaliakselilta)

$W_{y,g} = I_{y,g} / z_{max} = 97{,}95\times10^3\ \text{mm}^3$

Poikkileikkauskestävyys — Kohta 5.7

Taivutettu poikkileikkaus — Kohta 5.7.4

$M_{c,Rd} = W_{pl}f_y/\gamma_{M0} = 41{,}0$ kNm — Kaava 5.29

Taivutusmomentin mitoitusarvo $M_{Ed} = 14{,}4$ kNm, poikkileikkauksen taivutusmomenttikestävyys on riittävä.

Leikkausvoimalla kuormitettu poikkileikkaus — Kohta 5.7.5

$A_v = 800\ \text{mm}^2$

$V_{pl,Rd} = A_v\left(f_y/\sqrt{3}\right)/\gamma_{M0} = 193{,}15$ kN — Kaava 5.32

Leikkausvoiman mitoitusarvo $V_{Ed} = 14{,}4$ kN, poikkileikkauksen leikkausvoimakestävyys on riittävä.

Poikkileikkauksen yhdistetty kuormitus — Kohta 5.7.6

$V_{Ed} = 14{,}4\ \text{kN} > 0{,}5V_{pl,Rd} = 96{,}57\ \text{kN}$

Siten taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon.

Taivutetut sauvat — Kohta 6.4

Kiepahdus — Kohta 6.4.2

$M_{b,Rd} = \chi_{LT}W_y f_y/\gamma_{M1}$ — Kaava 6.13

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT}+\left[\phi_{LT}^2-\bar{\lambda}_{LT}^2\right]^{0,5}} \le 1$$ — Kaava 6.14

$$\phi_{LT} = 0{,}5\left(1+\alpha_{LT}\left(\bar{\lambda}_{LT}-0{,}4\right)+\bar{\lambda}_{LT}^2\right)$$ — Kaava 6.15

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\mathrm{y}} f_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{cr}}}}$$ Kaava 6.16

α_{LT} = 0,34 kylmämuovatuille profiileille

Määritetään kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa

$$M_{\mathrm{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}}{(kL)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_{\mathrm{w}}}\right)^2 \frac{I_{\mathrm{w}}}{I_{\mathrm{z}}} + \frac{(k\,L)^2 G I_{\mathrm{t}}}{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}} + \left(C_2 z_{\mathrm{g}}\right)^2} - C_2 z_{\mathrm{g}} \right)$$ Kaava E.1

Nivelellisesti tuetulle palkille, jossa tasan jakaantunut kuorma: C_1 = 1,13, and C_2 = 0,454 Taul. E.2

Olettamalla normaalituennan molemmissa päissä: $k = k_{\mathrm{w}} = 1$

z_{a} on voiman vaikutuskohdan koordinaatti

z_{s} on leikkauskeskiön koordinaatti

$z_{\mathrm{g}} = z_{\mathrm{a}} - z_{\mathrm{s}} = h/2 = 80$ mm

y_{G} = etäisyys uuman keskipisteestä painopisteeseen

$$y_{\mathrm{G}} = \frac{2b_{\mathrm{p,f}} t (g_{\mathrm{r}} + 0{,}5 b_{\mathrm{p,f}}) + 2 b_{\mathrm{p,l}} t (b - 0{,}5t)}{A_{\mathrm{s}}} = 46{,}4 \text{ mm}$$

$I_{\mathrm{z,sh}} = 4{,}590 \times 10^6$ mm^4

$I_{\mathrm{t,sh}} = 18{,}02 \times 10^3$ mm^4

$I_{\mathrm{w,sh}} = 23{,}19 \times 10^9$ mm^6

$I_{\mathrm{z}} = I_{\mathrm{z,sh}}\,(1-2\delta) = 4{,}406 \times 10^6$ mm^4

$I_{\mathrm{t}} = I_{\mathrm{t,sh}}\,(1-2\delta) = 17{,}30 \times 10^3$ mm^4

$I_{\mathrm{w}} = I_{\mathrm{w,sh}}\,(1-4\delta) = 21{,}33 \times 10^9$ mm^6

saadaan, $$M_{\mathrm{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}}{(kL)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_{\mathrm{w}}}\right)^2 \frac{I_{\mathrm{w}}}{I_{\mathrm{z}}} + \frac{(k\,L)^2 G I_{\mathrm{t}}}{\pi^2 E I_{\mathrm{z}}} + \left(C_2 z_{\mathrm{g}}\right)^2} - \left(C_2 z_{\mathrm{g}}\right) \right) = 34{,}76 \text{ kNm}$$ Kaava E.1

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\mathrm{y,g}} f_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{cr}}}} = 1{,}14$$ ($W_{\mathrm{y,g}} = 97{,}95 \times 10^3$ mm^3, puristettu laippa) Kaava 6.16

$$\phi_{\mathrm{LT}} = 0{,}5\left(1 + \alpha_{\mathrm{LT}}\left(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} - 0{,}4\right) + \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}^{\,2}\right) = 1{,}27$$ Kaava 6.15

$$\chi_{\mathrm{LT}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{LT}} + \left[\phi_{\mathrm{LT}}^{\,2} - \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}^{\,2}\right]^{0{,}5}} = 0{,}54$$ Kaava 6.14

$$M_{\mathrm{b,Rd}} = \chi_{\mathrm{LT}} W_{\mathrm{y}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}} = 22{,}21 \text{ kNm}$$ Kaava 6.13

Taivutusmomentin suunnitteluarvo $M_{\mathrm{Ed}} = 14{,}4$ kNm, kiepahduskestävyys on riittävä.

Huom.: Koska kuormitus ei välity U-profiilin leikkauskeskiön kautta, on tarpeellista tarkistaa sauvan vääntökestävyyden ja kiepahduskestävyyden yhteisvaikutus. Tässä esimerkissä kuitenkin tarkastetaan ainoastaan kiepahduskestävyys.

Leikkauslommahduskestävyys Kohta 6.4.3

Leikkauslommahduskestävyys tarkistetaan vain kun $h_{\mathrm{w}} / t \geq 56{,}2\varepsilon/\eta$ jäykistämättömälle uumalle. Kaava 6.20

η = 1,20, on suositusarvo.

$h_w / t = (h - 2t - 2r) / t = 140 / 5 = 28{,}0$, $56{,}2\varepsilon/\eta = 32{,}67$, leikkauslommahduskestävyyttä ei tarvitse tarkastella.

Taipumat — Kohta 6.4.6

Taipumat määritetään kuormitusyhdistelmille tarkoituksen mukaisessa käyttörajatilassa:

Kuormakerroin γ_G = 1,00 (pysyvät kuormat) ja γ_Q = 1,00 (muuttuvat kuormat) — EN 1991

Pysyvät kuormat (G): 2 kN/m^2 ja muuttuvat kuormat (Q): 3 kN/m^2

Kuormitustapaus tarkastellaan käyttörajatilassa, olettaen, että etäisyys viereisiin palkkeihin on 1,0 m :

$$q = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 5{,}0 \text{ kN/m}$$ — EN 1991

Palkin taipuma voidaan määrittää tavanomaisesti, poikkeuksena kuitenkin kimmomodulin sijasta käytetään sekanttimodulia.:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$$ — Kaava 6.52

missä:
E_{S1} sekanttimodulin arvo vastaten jännitystä vetolaipassa
E_{S2} sekanttimodulin arvo vastaten jännitystä puristuslaipassa

E_{S1} ja E_{S2} voidaan arvioida käyttörajatilan jännityksistä seuraavasti:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0{,}002 \dfrac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\dfrac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{and} \quad i = 1{,}2$$ — Kaava 6.53

missä:
$\sigma_{i,Ed,ser}$ on käyttörajatilan jännitys veto- tai puristuslaipassa
n on Ramberg-Osgood-mallin parametri; austeniittiselle teräslajille 1.4401, n = 7. — Taul. 6.4

Jännitys-venymä-kuvaajan epälineaarisuus tarkoittaa, että sekanttimodulin arvo vaihtelee poikkileikkauksessa ja palkin pituudella. Yksinkertaistuksena sekanttimodulin arvon vaihtelu voidaan jättää huomioon ottamatta ja valita sekanttimodulin minimiarvoa koko palkin jännevälillä. (sekanttimodulin minimiarvo vastaa palkin jännitysten σ_1 ja σ_2 maksimiarvoa).

Jännitykset veto- ja puristuslaipassa lasketaan seuraavasti:

Puristuslaippa:

$$\sigma_{Ed,ser,1} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,sup}} = 102{,}1 \text{ MPa}$$ ja E_{S1} = 199979,2 MPa — Kaava 6.53

kun $M_{Ed,max}$ = 10 kNm ja W_y = 97,95×10^3 mm^3

Vetolaippa:

$$\sigma_{Ed,ser,2} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,inf}} = 100{,}8 \text{ MPa}$$ ja E_{S2} = 199980,8 MPa

kun $M_{Ed,max}$ = 10 kNm and W_y = 99,24×10^3 mm^3

saadaan: E_S = 199980,0 MPa — Kaava 6.52

Maksimitaipuma voidaan laskea seuraavasti (kimmomodulin on korvattu sekanttimodulilla E_S):

$$d_{max} = \frac{5ql^4}{384 E_S I_y}$$

kun I_y = 8,297×10^6 mm^4, q = 5,0 kN/m and l = 4,0 m saadaan $d_{max} = 10,0\,\text{mm}$	Sivut 1 & 5

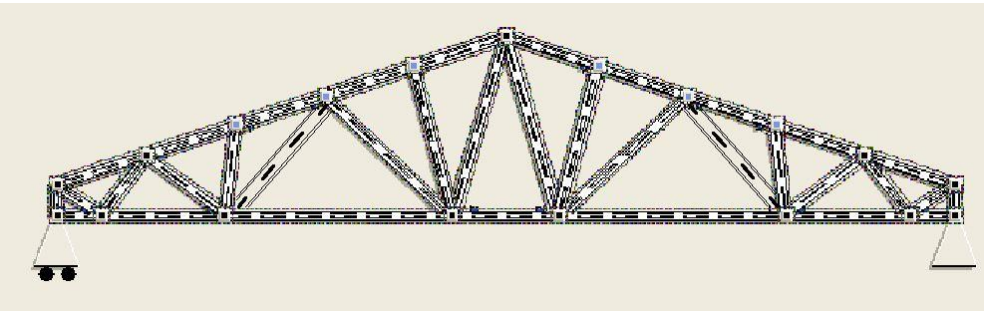
Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	Title	Mitoitusesimerkki 13 – Rakenneputkiristikko		
CALCULATION SHEET	Client	Research Fund for Coal and Steel	Made by PTY/AAT	Date 01/06
			Checked by MAP	Date 02/06
			Revised by MIG	Date 06/17

MITOITUSESIMERKKI 13 - RAKENNEPUTKIRISTIKKO

Lasikattoa tukeva rakenneputkiristikko valmistetaan austeniittisista neliö. - ja suorakaideprofiileista, joiden teräslaji on 1.4301. Käytössä on kaksi materiaalin lujuustasoa, hehkutetun tilan lujuus fy =210 N/mm^2 ja kylmämuokatun tilan lujuus CP500, f_y = 460 N/mm^2. Mitoitus tehdään murtorajatilassa ja pelitilanteessa 30 minuutin palonkestoajalle. Lujuusluokan CP500 materiaalille palotilanteen pienennystekijöiden arvot on laskettu käsikirjan kohdan 8.2 mukaisesti. Varmalla puolella olevana ristikon sauvojen nurjahduspituudeksi valitaan solmupisteiden välinen etäisyys.

Mitoitusesimerkissä tarkastellaan ristikon kolmea sauvaa: aksiaalisella vedolla kuormitettu alapaarre (sauva 0), aksiaalisella puristuksella kuormitettu diagonaali (sauva 31) ja yhdistetyllä taivutuksella ja aksiaalisella puristuksella kuormitettu yläpaarre (sauva 5). Myös ristikoiden painoa vertaillaan.

Ristikon liitosten mitoitusta esimerkissä ei käsitellä.



Hehkutetun tilan materiaali: alapaarre 100x60x4, yläpaarre 80x80x5, l 60x60x5 nurkan vertikaali vasemmalta oikealle: 50x50x3, 50x50x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3,40x40x3, 40x40x3.
Kylmämuokatun tilan materiaali CP500: alapaarre 60x40x4, yläpaarre 70x70x4, nurkan vertikaali 60x60x5, kaikki diagonaalit 40x40x3.

Jänneväli 15 m, ristikon korkeus keskellä 3,13 m, ristikon korkeus nurkissa 0,5 m.

Ristikoiden massat: Hehkutetun tilan materiaali: 407 kg, ja kylmämuokatun tilan materiaali CP500 307 kg. Massat eivät ole täysin optimoituja.

Kuormitukset

Oletetaan ristikkoon kohdistuvan tasainen lumikuorma, lasirakenteen ja kiinnitysten omapiano sekä ristikon omapaino. :

Pysyvät kuormat (G): Lasirakenne ja sen kiinnitykset 1 kN/m^2

Ristikon oma paino

Muuttuvat kuormat (Q): Lumikuorma 2 kN/m^2

Kuormitustapaus 1(murtorajatila): $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$ EN 1990

Kuormitustapaus 2(palotilanne): $\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_{\psi 1,1} Q_{k,1}$

Murtorajatila	Palotilanne	
$\gamma_{G,j}$ = 1,35 (epäedullinen vaikutus)	$\gamma_{GA,j}$ = 1,0	EN 1990
$\gamma_{Q,1}$ = 1,5	$\gamma_{\psi 1,1}$ = 0,2	EN 1991-1-2

(Osavarmuuslukujen suositusarvoja käytetään tässä esimerkissä)

Kuormitukset murtorajatilassa:

Pysyvät kuormat: Kuorma solmupisteissä: 1,35 x 4,1 kN

Ristikon omapaino (ohjelmisto ottaa huomioon)

Muuttuvat kuormat: Lumikuorma solmupisteissä: 1,5 x 8,1 kN

Sauvavoimat tarkasteltavissa sauvoissa:

Alapaarre, sauva 0

hehkutettu tila: 100x60x4 mm, Kylmämuokattu tila CP500: 60x40x4 mm

$N_{t,Ed}$ = 142,2 kN, $N_{t,fi,Ed}$ = 46,9 kN

$M_{max,Ed}$ = 0,672 kNm, $M_{max,fire,Ed}$ = 0,245 kNm

Yläpaarre, sauva 5

Hehkutettu tila: 80x80x5 mm, Kylmämuokattu tila CP500: 70x70x4 mm

$N_{c,Ed}$ = -149,1 kN, $N_{c,fire,Ed}$ = -49,2 kN

$M_{max,Ed}$ = 2,149 kNm, $M_{max,fire,Ed}$ = 0,731 kNm

Diagonaali, sauva 31

Hehkutettu tila: 50x50x3mm, Kylmämuokattu tila CP500: 40x40x3 mm

$N_{c,Ed}$ = -65,9 kN, $N_{c,fire,Ed}$ = -21,7 kN

Materiaaliominaisuudet

Teräslaji 1.4301.

Hehkutettu tila:	f_y = 210 N/mm^2	f_u = 520 N/mm^2	E = 200000 N/mm^2	Taul.2.2
CP500:	f_y = 460 N/mm^2	f_u = 650 N/mm^2	E = 200000 N/mm^2	Taul.2.3

Osavarmuusluvut

Taul.4.1 and Kohta 8.1

γ_{M0} = 1,1, γ_{M1} = 1,1, $\gamma_{M,fi}$ = 1,0

Poikkileikkaussuureet: Hehkutettu tila

Sauva 0:	A = 1175 mm^2			$W_{pl,y}$ = 37,93×10^3 mm^3
Sauva 5:	A = 1436 mm^2	I_y = 131,44×10^4 mm^4	i_y=30,3 mm	$W_{pl,y}$ = 39,74×10^3 mm^3
Sauva 31:	A = 541 mm^2	I_y = 19,47×10^4 mm^4	i_y = 19 mm	$W_{pl,y}$ = 9,39×10^3 mm^3

Poikkileikkaussuureet: Kylmämuokattu tila CP500

Sauva 0:	A = 695 mm			$W_{pl,y}$ = 13,16×10^3 mm^3
Sauva 5:	A = 1015 mm^2	I_y = 72,12×10^4 mm^4	i_y = 26,7 mm	$W_{pl,y}$ = 24,76×10^3 mm^3
Sauva 31:	A = 421 mm^2	I_y = 9,32×10^4 mm^4	i_y = 14,9 mm	$W_{pl,y}$ = 5,72×10^3 mm^3

Poikkileikkausluokitus: Sauva 5 ja sauva 31

Hehkutettu tila: ε = 1,03 $CP500$: ε = 0,698 Taul.5.2

Hehkutettu tila 80x80x5: c = 80 – 15 = 65 mm CP500 70x70x4 : c = 70 – 12 = 58 mm

Hehkutettu tila 50x50x : c = 50 – 9 = 41 mm CP500 40x40x3 : c = 40 – 9 = 31 mm

Laippa/uuma puristuksella: Taul.5.2

Hehkutettu tila 80x80x5 : c/t = 13 CP500 70x70x4 : c/t = 14,5

Hehkutettu tila 50x50x3 : c/t = 13,7 CP500 40x40x3 : c/t = 10,3

Poikkileikkausluokassa 1, $\frac{c}{t} \leq 33{,}0\varepsilon$, sauvat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1

ALAPAARRE, MURTORAJATILA JA PALOTILANNE, MITOITUS (Sauva 0)

A) Murtorajatila

Poikkileikkauksen vetokestävyys Kohta 5.7.2

$N_{\mathrm{pl,Rd}} = A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{M0}$ Kaava 5.23

Hehkutettu tila: $N_{\mathrm{pl,Rd}}$ = 1175 ×210 / 1,1 = 224,3 kN > 142,2 kN OK.

CP500 : $N_{\mathrm{pl,Rd}}$ = 695 × 460 / 1,1 = 290,6 kN > 142,2 kN OK.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys Kohta 5.7.4

$M_{\mathrm{c,Rd}} = W_{\mathrm{pl}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$ Kaava 5.29

Hehkutettu tila: $M_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{37{,}93 \times 10^3 \times 210}{1{,}1 \times 10^6}$ = 7,24 kNm > 0,672 kNm OK.

CP500: $M_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{13{,}16 \times 10^3 \times 460}{1{,}1 \times 10^6}$ = 5,50 kNm > 0,672 kNm OK.

Yhteisvaikutus

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{y,Rd}}} \leq 1$$ Kaava 6.55

Hehkutettu tila: $\frac{142{,}2}{224{,}3} + \frac{0{,}672}{7{,}24} = 0{,}73 \leq 1$ OK.

CP500: $\frac{142{,}2}{290{,}6} + \frac{0{,}672}{5{,}50} = 0{,}61 \leq 1$ OK.

B) Palotilanteen mitoitus

$\varepsilon_{\mathrm{res}}$ = 0,4 Kohta 8.4.4

Teräksen lämpötila (30 min) 100x60x4, A_{m}/V = 275 m^{-1}: θ = 833 °C

Teräksen lämpötila (30 min) 60x40x4, A_{m}/V = 290 m^{-1}: θ = 834 °C

Hehkutettu tila:

Pienennystekijöiden arvot lämpötilassa 834°C voidaan interpoloida: Kohta 8.2 Taul.8.1

$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_{\mathrm{y}}$ = 0,292, mutta $f_{2,\theta} \leq f_{\mathrm{u},\theta}$

$k_{\mathrm{u},\theta} = f_{\mathrm{u},\theta}/f_{\mathrm{u}}$ = 0,209

$f_{2,\theta}$ = 0,292 × 210 = 61,3 and $f_{\mathrm{u},\theta}$ = 0,209 × 520 = 108,7, siten $f_{2,\theta} \leq f_{\mathrm{u},\theta}$

KYLMÄMUOKATTU TILA CP500: Kohta 8.2

kun kylmämuokatun teräksen lämpötila $\theta \geq$ 800 °C: Taul.8.1

$k_{2,\theta,\mathrm{CF}} = f_{2,\theta,\mathrm{CF}}/f_{\mathrm{y}} = 0{,}9k_{2,\theta} = 0{,}9f_{2,\theta}/f_{\mathrm{y}} = 0{,}9 \times 0{,}292 = 0{,}263$, mutta $f_{2,\theta,\mathrm{CF}} \leq f_{\mathrm{u},\theta,\mathrm{CF}}$

$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0{,}209$

$f_{2,\theta,CF} = 0{,}263 \times 460 = 121{,}0$ ja $f_{u,\theta,CF} = 0{,}209 \times 650 = 135{,}9$, siten $f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$

Poikkileikkauksen vetokestävyys

$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}]$ — Kaava 8.8

Hehkutettu tila*:* $N_{fi,\theta,Rd} = 0{,}292 \times 224{,}3 \times 1{,}1/1{,}0 = 72{,}0$ kN > 46,9 kN OK.

CP500: $N_{fi,\theta,Rd} = 0{,}263 \times 290{,}6 \times 1{,}1/1{,}0 = 84{,}1$ kN > 46,9 kN OK.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left[\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi} \right]$ — Kaava 8.15

Hehkutettu tila*:* $M_{fi,\theta,Rd} = 0{,}292 \times 7{,}24 \times 1{,}1/1{,}0 = 2{,}33$ kNm > 0,245 kNm OK.

CP500*:* $M_{fi,\theta,Rd} = 0{,}263 \times 5{,}50 \times 1{,}1/1{,}0 = 1{,}59$ kNm > 0,245 kNm OK.

Yhteisvaikutus

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

Kaava 6.55

Hehkutettu tila $\frac{46{,}9}{72{,}0} + \frac{0{,}245}{2{,}33} = 0{,}75 \leq 1$ OK

CP500: $\frac{46{,}9}{84{,}1} + \frac{0{,}245}{1{,}59} = 0{,}71 \leq 1$ OK.

DIAGOONAALI, MITOITUS, MURTORAJATILA JA PALOTILANNE — (Sauva 31)

Nurjahduspituus = 1253 mm

A) Murtorajatila

$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$ — Kaava 6.2

Hehkutettu tila:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{19} \frac{1}{\pi} \sqrt{(210/200000)} = 0{,}680$$

Kaava 6.6

$$\phi = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0{,}5 \times (1 + 0{,}49 \times (0{,}680 - 0{,}3) + 0{,}680^2) = 0{,}824$$

Kaava 6.5
Taul.6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{0{,}824 + \sqrt{(0{,}824^2 - 0{,}680^2)}} = 0{,}776$$

Kaava 6.4

$N_{b,Rd} = 0{,}776 \times 541 \times 210 / 1{,}1 = 80{,}1$ kN > 65,9 kN OK.

CP500:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{14{,}9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460/200000)} = 1{,}284$$

Kaava 6.6

$\phi = 0{,}5(1+\alpha(\overline{\lambda}-\overline{\lambda}_0)+\overline{\lambda^2})$ = 0,5×(1+0,49×(1,284-0,3)+1,284²) = 1,565 — Kaava 6.5 Taul.6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi+\sqrt{(\phi^2-\overline{\lambda^2})}} = \frac{1}{1{,}565+\sqrt{(1{,}565^2-1{,}284^2)}} = 0{,}407$$ — Kaava 6.4

$N_{b,Rd}$ = 0,407×421 × 460 /1,1 = 71,7 kN > 65,9 kN OK.

B) Palotilanne

ε_{res} = 0,4 — Kohta 8.4.4

Teräksen Lämpötila (30 min) 80x80x5, A_m/V = 220 m^{-1}: θ = 830 °C

Teräksen lämpötila (30 min) 70x70x5, A_m/V = 225 m^{-1}: θ = 831 °C

Varmalla puolella olevana valitaan θ = 831 °C.

Hehkutettu tila:

Pienennystekijöiden arvot lämpötilassa 831 °C saadaan interpoloimalla: — Kohta 8.2 Taul.8.1

$k_{p0,2,\theta}$ = 0,219 and $k_{E,\theta}$ = 0,574

Poikkileikkausluokitus — Kohta 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon\left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}\right]^{0,5} = 1{,}03\times\left[\frac{0{,}574}{0{,}219}\right]^{0,5} = 1{,}67$$ — Kaava 8.6

Poikkileikkausluokalle 1: $c/t \le 33{,}0\ \varepsilon_\theta$ = 33,0×1,67 = 55,1

Poikkileikkausluokka 1, c/t = 13, profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

CP500:

kun kylmämuokatun teräksen lämpötila θ ≥ 800 °C: — Kohta 8.2 Taul.8.1

$k_{p0,2,\theta,CF} = 0{,}8k_{p0,2,\theta}$ = 0,8×0,219 = 0,175

$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta}$ = 0,574

Poikkileikkausluokitus — Kohta 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon\left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}\right]^{0,5} = 0{,}698\times\left[\frac{0{,}574}{0{,}175}\right]^{0,5} = 1{,}26$$ — Kaava 8.6

Poikkileikkausluokalle 1: $c/t \le 33{,}0\ \varepsilon_\theta$ = 33,0×1,26 = 41,6

Poikkileikkausluokka 1Class 1, c/t = 14,5, profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{p0,2,\theta}\ f_y / \gamma_{M,fi}$ kun profiilit kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1. — Kaava 8.10

Hehkutettu tila :

$$\overline{\lambda}_\theta = \overline{\lambda}\sqrt{(k_{p0,2,\theta}/k_{E,\theta})} = 0{,}680\times\sqrt{(0{,}219/0{,}574)} = 0{,}420$$ — Kaava 8.14

$\phi_\theta = 0{,}5(1+\alpha(\overline{\lambda_\theta}-\overline{\lambda}_0)+\overline{\lambda_\theta^2})$ = 0,5×(1+0,49×(0,420-0,3)+0,420²) = 0,618 — Kaava 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta+\sqrt{(\phi_\theta^2-\overline{\lambda_\theta^2})}} = \frac{1}{0{,}618+\sqrt{(0{,}618^2-0{,}420^2)}} = 0{,}933$$ — Kaava 8.12

$N_{b,fi,t,Rd}$ = 0,933×541 ×0,219×210 /1,0 = 23,2 kN > 21,7 kN OK.

CP500 :

$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\sqrt{(k_{p0,2,\theta,CF} / k_{E,\theta,CF})} = 1,284 \times \sqrt{(0,175 / 0,574)}$ = 0,709 — Kaava 8.14

$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2)$ = 0,5× (1+0,49× (0,709-0,3)+0,709²) = 0,852 — Kaava 8.13

$\chi_{fi} = \dfrac{1}{\phi_\theta + \sqrt{(\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \dfrac{1}{0,852 + \sqrt{(0,852^2 - 0,709^2)}}$ = 0,755 — Kaava 8.12

$N_{b,fi,t,Rd}$ = 0,755×421 ×0,175×460 /1,0 = 25,6 kN > 21,7 kN OK.

YLÄPAARRE, MITOITUS, MURTORAJATILA JA PALOTILANNE

(Sauva 5)

Nurjahduspituus= 1536 mm

A) Murtorajatila

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y\left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}e_{Ny}}{\beta_{W,y}W_{pl,y}f_y / \gamma_{M1}}\right) \le 1,0$$ — Kaava 6.56

Hehkutettu tila *:*

$\beta_{W,y}$ = 1,0 poikkileikkausluokassa 1 — Sec. 6.5.2

$k_y = 1 + D_1(\bar{\lambda}_y - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$, but $k_y \le 1 + D_1(D_3 - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$ — Kaava 6.63

missä D_1 = 2,0, D_2 = 0,3 ja D_3 = 1,3 — Taul.6.6

$\bar{\lambda} = \dfrac{L_{cr}}{i}\dfrac{1}{\pi}\sqrt{(f_y / E)} = \dfrac{1536}{30,3} \times \dfrac{1}{\pi} \times \sqrt{(210 / 200000)}$ = 0,523 — Kaava 6.6

$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$ = 0,5×(1+0,49×(0,523-0,3)+0,523²) = 0,691 — Kaava 6.5

$\chi = \dfrac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \dfrac{1}{0,691 + \sqrt{(0,691^2 - 0,523^2)}}$ = 0,875 — Kaava 6.4

$N_{b,Rd,y}$ = 0,875×1436 ×210 /1,1 = 239,9 kN > 149,1 kN — Kaava 6.2

k_y = 1,0+2,0×(0,523 - 0,30)×149,1/239,9 = 1,277 — Taul.6.6

$k_y \le$ 1,0+2,0×(1,3 -0,30)×149,1/239,9 = 2,243, siten, k_y = 1,277

$\dfrac{149,1}{239,9} + 1,277 \times \left(\dfrac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1,1}\right)$ = 0,98 < 1,0 OK. — Kaava 6.56

CP500

$\beta_{W,y}$ = 1,0 poikkileikkausluokassa 1 — Kohta 6.5.2

$\bar{\lambda} = \dfrac{L_{cr}}{i}\dfrac{1}{\pi}\sqrt{(f_y / E)} = \dfrac{1536}{26,7} \times \dfrac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)}$ = 0,878 — Kaava 6.6

$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$ = 0,5×(1+0,49×(0,878-0,3)+0,878²) = 1,027 — Kaava 6.5

$\chi = \dfrac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \dfrac{1}{1,027 + \sqrt{(1,027^2 - 0,878^2)}}$ = 0,641 — Kaava 6.4

$N_{b,Rd,y}$ = 0,641×1015 ×460 /1,1 = 272,1 kN > 149,1 kN — Kaava 6.2

k_y = 1,0+2×(0,878 - 0,30)×149,1/272,1 = 1,633 — Taul.6.6

$k_y \leq$ 1,0+2,0×(1,3 - 0,30)×149,1/272,1 = 2,096, siksi k_y = 1,633

$$\frac{149,1}{272,1} + 1,633 \times \left(\frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460/1,1} \right) = 0,89 < 1,0 \text{ OK.}$$ — Kaava 6.56

B) Palotilanne

ε_{res} = 0,4 — Kohta 8.4.4

Teräksen lämpötila (30 min.) 50x50x3, A_m/V = 370 m^{-1}: θ = 836 °C

Teräksen lämpötila (30 min.) 40x40x3, A_m/V = 380 m^{-1}: θ = 836 °C

Hehkutettu tila:

Pienennystekijän arvot lämpötilassa 836 °C saadaan interpoloimalla: — Kohta 8.2, Taul.8.1

$k_{p0,2,\theta}$ = 0,214

$k_{2,\theta}$ = $f_{2,\theta}/f_y$ = 0,289, muttat $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

$k_{u,\theta}$ = $f_{u,\theta}/f_u$ = 0,207

$f_{2,\theta}$ = 0,289 × 210 = 60,7 ja $f_{u,\theta}$ = 0,207 × 520 = 107,6, siten $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

$k_{E,\theta}$ = 0,565

Poikkileikkausluokitus — Kohta 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 1,03 \times \left[\frac{0,565}{0,214} \right]^{0,5} = 1,67$$ — Kaava 8.6

Poikkileikkausluokalle 1: $c/t \leq 33,0\ \varepsilon_\theta$ = 33,0×1,67 = 55,1

Poikkileikkausluokka 1, c/t = 13,7, profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

CP500:

Kun kylmämuokatun teräksen lämpötila $\theta \geq$ 800 °C: — Kohta 8.2, Taul.8.1

$k_{p0,2,\theta,CF}$ =0,8$k_{p0,2,\theta}$ = 0,8×0,214 = 0,171

$k_{2,\theta,CF}$ = $f_{2,\theta,CF}/f_y$ = 0,9$k_{2,\theta}$ = 0,9$f_{2,\theta}/f_y$ = 0,9×0,289 = 0,260, mutta $f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$

$k_{u,\theta,CF}$ = $k_{u,\theta}$ = $f_{u,\theta,CF}/f_u$ = 0,207

$f_{2,\theta,CF}$ = 0,260 × 460 = 94,8 ja $f_{u,\theta,CF}$ = 0,207 × 650 = 134,6, siten $f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$

$k_{E,\theta,CF}$ = $k_{E,\theta}$ = 0,565

Poikkileikkausluokitus — Kohta 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 0,698 \times \left[\frac{0,565}{0,171} \right]^{0,5} = 1,27$$ — Kaava 8.6

Poikkileikkausluokalle 1: $c/t \leq 33,0\ \varepsilon_\theta$ = 33,0×1,27 = 41,9

Poikkileikkausluokka 1, c/t = 10,3 < 41,9, siten profiili kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq 1,0$$ kun profiilit kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 — Kaava 8.26

Hehkutettu tila:

$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,523 \times \sqrt{(0,214 / 0,565)} = 0,322$ — Kaava 8.14

$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^{\,2}) = 0,5\times(1+0,49\times(0,322-0,3)+0,322^2) = 0,557$ — Kaava 8.13

$\chi_{fi} = \dfrac{1}{\phi_\theta + \sqrt{(\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \dfrac{1}{0,557 + \sqrt{(0,557^2 - 0,322^2)}} = 0,989$ — Kaava 8.12

$k_y = 1 - \dfrac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A_g k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}} \le 3$ — Kaava 8.30

$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \le 0,8$ — Kaava 8.31

$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$ =0,989×1436 × 0,214×210 /1,0 = 63,8 kN > 49,2 kN OK. — Kaava 8.26

$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta}[\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}]M_{Rd} = 0,289\times1,1/1,0\times39,74\times10^3\times210/1000^2 = 2,65$ kNm >0,731 kNm OK. — Kaava 8.15

ψ = -0,487 /0,731 = -0,666 — Taul.8.3

$\beta_{M,y}$ = 1,8-0,7ψ = 2,266

μ_y = (1,2×2,266-3) ×0,322 + 0,44×2,266 – 0,29 = 0,617 < 0,8

k_y = 1- 0,617×49,2 kN/63,8 kN = 0,524 < 3

$\dfrac{49,2}{63,8} + 0,524 \times \dfrac{0,731}{2,65}$ = 0,92 < 1,0 OK.

CP500 :

$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}\sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,878 \times \sqrt{(0,171 / 0,565)} = 0,483$ — Kaava 8.14

$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^{\,2}) = 0,5\times(1+0,49\times(0,483-0,3)+0,483^2) = 0,661$ — Kaava 8.13

$\chi_{fi} = \dfrac{1}{\phi_\theta + \sqrt{(\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \dfrac{1}{0,661 + \sqrt{(0,661^2 - 0,483^2)}} = 0,899$ — Kaava 8.12

$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$ = 0,899×1015 ×0,171×460 /1,0 = 71,8 kN > 49,2 kN OK. — Kaava 8.26

$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta}[\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}]M_{Rd} = 0,260\times1,1/1,0\times24,76\times10^3\times460/1000^2 = 3,26$ kNm >0,731 kNm OK. — Kaava 8.15

ψ = -0,487 /0,73 = -0,666 — Taul.8.3

$\beta_{M,y}$ = 1,8-0,7ψ = 2,266

μ_y = (1,2×2,266-3)×0,483 + 0,44×2,266 – 0,29 = 0,571 ≤ 0,8

k_y = 1- 0,571×49,2 /71,8 = 0,609

$\dfrac{49,2}{71,8} + 0,609 \times \dfrac{0,731}{3,26}$ = 0,82 < 1,0 OK.

MITOITUSESIMERKKI 14 – KYLMÄMUOVATUN PROFIILIN KESKIMÄÄRÄISEN KOROTETUN MYÖTÖLUJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Tämä esimerkki havainnollistaa rullamuovaamalla (kylmämuovaus) valmistetun neliömäisen rakenneputken (SHS) keskimääräisen korotetun myötölujuuden f_{ya} määrittämisen käsikirjan liitteen B mukaisesti. Laskelma on tehty austeniittisesta teräslajista 1.4301 valmistetulle profiilille SHS 80×80×4. Lopuksi on vertailu minimi myötölujuuden f_{y} ja keskimääräisen korotetun myötölujuuden f_{ya} perusteella määritettyjen taivutuskestävyyksien kesken.

Keskimääräinen korotettu myötölujuus

Rullamuovaamalla valmistetuille rakenneputkille (RHS ja SHS), keskimääräinen korotettu myötölujuus f_{ya} saadaan:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc}\,A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$$ Kaava B.2

Poikkileikkaussuureet

Profiilin SHS 80×80×4 geometria (mitatut suureet):

h = 79,9 mm b = 79,6 mm

t = 3,75 mm A = 1099 mm^2

W_{el} = 25967 mm^3 W_{pl} = 30860 mm^3

r_{i} = 4,40 mm (Huom. r_{i} voidaan ottaa 2t jos muuta ei tiedetä) Liite B

$$A_{\mathrm{c,rolled}} = \left(n_{\mathrm{c}}\,\pi\frac{t}{4}\right)(2r_{\mathrm{i}} + t) + 4n_{\mathrm{c}}t^2$$ Kaava B.14

$$A_{\mathrm{c,rolled}} = \left(4\times\pi\times\frac{3{,}75}{4}\right)\times(2\times4{,}40 + 3{,}75) + 4\times4\times3{,}75^2 = 373\ \mathrm{mm}^2$$

Materiaaliominaisuudet

f_{y} = 230 N/mm^2 ja f_{u} = 540 N/mm^2 (kylmävalssatulle nauhalle t ≤ 8 mm) Taul. 2.2

$E = 200000\ \mathrm{N/mm^2}$ Kohta 2.3.1

$\varepsilon_{\mathrm{p0,2}} = 0{,}002 + f_{\mathrm{y}}/E = 0{,}00315$ Kaava B.10

$\varepsilon_{\mathrm{u}} = 1\text{-}\,f_{\mathrm{y}}/f_{\mathrm{u}} = 0{,}57$ Kaava C.6

Nurkka-alueen ja sivujen taso-osien korotettu lujuus

Nurkka-alueen korotetun myötölujuuden f_{yc} arvo:

$$f_{\mathrm{yc}} = 0{,}85K\left(\varepsilon_{\mathrm{c}} + \varepsilon_{\mathrm{p0,2}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \quad \text{ja} \quad f_{\mathrm{y}} \le f_{\mathrm{yc}} \le f_{\mathrm{u}}$$ Kaava B.4

Taso-osien korotettu myötölujuus f_{yf}:

$$f_{\mathrm{yf}} = 0{,}85K\left(\varepsilon_{\mathrm{f}} + \varepsilon_{\mathrm{p0,2}}\right)^{n_{\mathrm{p}}} \quad \text{and} \quad f_{\mathrm{y}} \leq f_{\mathrm{yf}} \leq f_{\mathrm{u}}$$ Kaava B.5

Kylmämuovauksen nurkka-alueille ja sivujen taso-osille aiheuttama plastinen venymä

Nurkka-alueen venymä ε_{c}:

$$\varepsilon_{\mathrm{c}} = \frac{t}{2(2r_{\mathrm{i}} + t)}$$ Kaava B.7

$$\varepsilon_{\mathrm{c}} = \frac{3{,}75}{2 \times (2 \times 4{,}40 + 3{,}75)} = 0{,}149$$

Sivujen taso-osien venymä ε_{f}:

$$\varepsilon_f = \left[\frac{t}{900}\right] + \left[\frac{\pi t}{2(b + h - 2t)}\right]$$ Kaava B.8

$$\varepsilon_f = \left[\frac{3{,}75}{900}\right] + \left[\frac{\pi \times 3{,}75}{2 \times (79{,}6 + 79{,}9 - 2 \times 3{,}75)}\right] = 0{,}043$$

Materiaalimallin parametrit

$$n_p = \frac{ln(f_y/f_u)}{ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)}$$ Kaava B.12

$$n_p = \frac{ln(230/540)}{ln(0{,}00315/0{,}57)} = 0{,}164$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}}$$ Kaava B.11

$$K = \frac{230}{(0{,}00315)^{0{,}164}} = 591{,}6\ N/mm^2$$

Nurkka-alueen ja sivujen taso-osien korotettu lujuus

Nurkka-alueen korotettu myötölujuus f_{yc}: Kaava B.4

$$f_{\mathrm{yc}} = 0{,}85 \times 591{,}6 \times (0{,}149 + 0{,}00315)^{0{,}164}$$

$$= 369\ \mathrm{N/mm^2} \text{ and } 230 \leq 369 \leq 540$$

Taso-osien korotettu myötölujuus: Kaava B.5

$$f_{\mathrm{yf}} = 0{,}85 \times 591{,}6 \times (0{,}043 + 0{,}00315)^{0{,}164}$$

$$= 304\ \mathrm{N/mm^2} \text{ and } 230 \leq 304 \leq 540$$

Poikkileikkauksen keskimääräinen korotettu myötölujuus

$$f_{\mathrm{ya}} = \frac{f_{\mathrm{yc}}\, A_{\mathrm{c,rolled}} + f_{\mathrm{yf}}(A - A_{\mathrm{c,rolled}})}{A}$$ Kaava B.2

$$= \frac{369 \times 373 + 304 \times (1099 - 373)}{1099} = 326\ N/mm^2$$

Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokitus, kun minimi myötölujuus f_y:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} = \left[\frac{235}{230}\times\frac{200000}{210000}\right]^{0,5} = 0{,}986$$ Taul. 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79{,}9 - 3\times 3{,}75)}{3{,}75} = 18{,}3 < 32{,}5 = 33\varepsilon$$

siten poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Poikkileikkausluokitus, kun keskimääräinen korotettu myötölujuus f_y:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5} = \left[\frac{235}{326}\times\frac{200000}{210000}\right]^{0,5} = 0{,}829$$ Taul. 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79{,}9 - 3\times 3{,}75)}{3{,}75} = 18{,}3 < 27{,}4 = 33\varepsilon$$

siten poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

Poikkileikkausluokille 1 ja 2:

$$M_{c,Rd} = W_{pl}\, f_y/\gamma_{M0}$$ Kaava 5.29

Kestävyys perustuen minimi myötölujuuteen $\boldsymbol{f}_y$:

$$M_{c,Rd} = \frac{30860\times 230}{1{,}1} = 6{,}45\ kNm$$

Kestävyys perustuen keskimääräiseen korotettuun myötölujuuteen $\boldsymbol{f}_{ya}$:

$$M_{c,Rd} = \frac{30860\times 326}{1{,}1} = 9{,}15\ kNm$$

Kun otetaan huomioon profiilin valmistuksen aikainen kylmämuokkautuminen, taivutuskestävyys kasvaa 42%.

Huom.: Mitoitusesimerkissä 15 havainnollistetaan käytön aikaisen myötölujittumisen vaikutus taivutuskestävyyden kasvamiseen määrittämällä jatkuvan lujittumisen menetelmällä käsikirjan liitteen D mukaisesti.

MITOITUSESIMERKKI 15 – TAIVUTUKSELLA KUORMITETUN POIKKILEIKKAUKSEN MITOITUS JATKUVAN LUJITTUMISEN MENETELMÄLLÄ (CSM)

Mitoitusesimerkissä esitetään taivutusmomentin poikkileikkauskestävyyden mitoitusarvon määrittäminen jatkuvan lujittumisen menetelmällä (CSM, käsikirjan liite D) rullamuovaamalla (Kylmämuovaus) valmistetulle SHS 80×80×4 austeniittiselle 1.4301 palkille.

Poikkileikkaussuureet

Poikkileikkaussuureet on esitetty mitoitusesimerkissä 14.

Materiaaliominaisuudet

f_y = 326 N/mm^2 * ja f_u = 540 N/mm^2 — Taul. 2.2

E = 200000 N/mm^2 ja υ = 0,3 — Kohta 2.3.1

$\varepsilon_y = f_y/E = 0{,}0016$

$\varepsilon_u = 1\text{-}f_y/f_u = 0{,}40$ — Kaava C.6

* Mitoitusesimerkissä havainnollistetaan jatkuvan lujittumisen menetelmällä saavutettua lisäystä taivutuskestävyyteen vielä sen lisäksi mitä on saavutettu käyttämällä profiilin valmistuksessa tapahtuneen lujittumisen, keskimääräisen korotetun myötölujuuden käytön. avulla (mitoitusesimerkki 14). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää standardin mukaista minimi myötölujuutta.

Poikkileikkauksen hoikkuus

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}}$$ — D.3.2

$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1-\upsilon^2)\bar{b}^2} = \frac{4 \times \pi^2 \times 200000 \times 3{,}75^2}{12 \times (1-0{,}3^2) \times \left(79{,}7 - 2(3{,}75 + 4{,}40)\right)^2} = 2530\ \mathrm{N/mm^2}$$ — Kaava D.4 ja Taul. 5.3

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{326}{2530}} = 0{,}36\ (< 0{,}68)$$

Poikkileikkauksen muodonmuutoskapasiteetti

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0{,}25}{\bar{\lambda}_p^{\,3{,}6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) \quad \text{for } \bar{\lambda}_p \leq 0{,}68$$ — Kaava D.2

Taulukosta D.1, $C_1 = 0.1$ austeniittisille ruostumattomille teräksille. — Taul. D.1

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0{,}25}{0{,}36^{3{,}6}} = 9{,}9 \leq \min\left(15, \frac{0{,}1 \times 0{,}40}{0{,}0016} = 25\right)$$

$$\therefore \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 9{,}9$$

Myötöalueen kulmakerroin

Taulukosta D.1, $C_2 = 0{,}16$ austeniittisille ruostumattomille teräksille. — Taul. D.1

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2\varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{540 - 326}{0{,}16 \times 0{,}40 - 0{,}0016} = 3429\ \mathrm{N/mm^2}$$ — Kaava D.1

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}\left[1 + \frac{E_{sh}}{E}\frac{W_{el}}{W_{pl}}\left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1\right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}}\right) \Big/ \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\right)^{\alpha}\right]$$ — Kaava D.9

$\alpha = 2{,}0$ RHS profiileille — Taul. D.2

$$\mathrm{M_{c,Rd}} = \mathrm{M_{csm,Rd}}$$
$$= \frac{30860 \times 326}{1{,}1} \times \left[1 + \frac{3429}{200000} \times \frac{25967}{30860} \times (9{,}9 - 1) - \left(1 - \frac{25967}{30860}\right) \Big/ (9{,}9)^{2{,}0}\right]$$
$$\mathrm{M_{c,Rd}} = 10{,}31\ \mathrm{kNm}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo luvun 5 mukaisesti määritettynä on 6,45 kNm perustuen standardin mukaiseen minimi myötölujuuteen f_y. Hyödyntämällä valmistuksessa tapahtunut muokkauslujittuminen käyttämällä keskimääräistä korotettua myötölujuutta f_{ya} taivutuskestävyyden arvo on 9,15 kNm mitoitusesimerkin 14 mukaisesti. Kun edellisen lisäksi huomioidaan käytön aikainen myötölujittuminen jatkuvan lujittumisen menetelmällä (CSM) poikkileikkauksen mitoituksessa, taivutuskestävyyden arvoksi saavutetaan 10,31 kNm. Hyödyntämällä keskimääräinen korotettu myötölujuus ja jatkuvan lujittuminen menettely savutetaan taivutuskestävyydelle 60 %:n kasvu verrattuna standardin mukaisella minimi myötölujuudella määritettyyn.

KÄSIKIRJA -
RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN KÄYTTÖ KANTAVISSA RAKENTEISSA
NELJÄS PAINOS

Ruostumattomia teräksiä käytetään hyvin yleisesti rakentamisen kohteissa, joissa käyttökohteen korroosiorasitus voi vaihdella vähäisestä erittäin aggressiiviseen. Ruostumattomien teräslajien korroosionkestävyys perustuu niiden seostukseen. Koska ruostumattomia teräslajeja on suuri määrä ja koska tietty teräslaji eritellään seosaineiden ja niiden määrän perusteella, voidaan tietyn korroosiorasituksen omaavaan käyttökohteeseen valita optimaalinen ruostumaton teräslaji. Tämä tarkoittaa, että ruostumattoman teräksen ominaisuudet eivät muutu suunnitellun käyttöiän aikana ja rakenteen ylläpito tapahtuu hyvin vähäisillä huoltotoimilla.

Korroosionkestävyyden lisäksi ruostumattoman teräksen pinnan viimeistelylle on useita vaihtoehtoja, joilla voidaan vaikuttaa käyttökohteen esteettiseen vaikutelmaan. Mekaanisen kestävyyden osalta ruostumattomat teräkset ovat lujia, mutta myös keveitä materiaaleja. Ruostumaton teräs mukautuu hyvin yleisesti käytössä oleviin konepajan valmistusmenetelmiin.

Ruostumattoman teräksen korroosionkestävyyden ja esteettisyyden lisäksi kantavien rakenteiden käyttökohteissa edellytetään myös rakenteiden mitoitus.

Käsikirjassa esitellään mitoitusohjeet austeniittisille, duplex ja ferriittisille ruostumattomille teräksille. Esitetyt ohjeet ovat yhdenmukaiset vuonna 2015 julkaistun rakenteellisten ruostumattomien terästen eurokoodin EN 1993-1-4 muutoksen (amendment) kanssa. Suunnitteluohjeet käsittelevät poikkileikkausten, sauvojen ja kiinnitysten suunnittelun sekä palotilanteen suunnittelun lisäksi uudet ruostumattoman teräksen myötölujittumisen hyödyntävät mitoitusmenetelmät. Käsikirja sisältää myös ohjeita ruostumattoman teräslajin valintaan, säilyvyyden varmistamiseksi ja valmistusmenetelmistä. Suunnittelusääntöjen käyttöä havainnollistetaan 15 mitoitusesimerkin avulla

SCI Ref: P413

ISBN 978-1-85942-226-7

SCI
Silwood Park, Ascot, Berkshire. SL5 7QN UK
T: +44 (0)1344 636525
F: +44 (0)1344 636570
E: reception@steel-sci.com
www.steel-sci.com

TRY ry
Eteläranta 10, 10 krs
00130 Helsinki
www.terasrakenneyhdistys.fi