

Sisällys

1		
	LUENNOITSIJAN TEKSTI	1
	JOHDANTO	1
	MITÄ ON RUOSTUMATON TERÄS?.....	2
	KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSET	5
	TERÄSLAJIT JA TERÄSLAJIN VALINTAMENETTELY	5
	RUOSTUMATTOMAN TERÄKSEN OMINAISUUDET.....	7
	RUOSTUMATTOMIEN TERÄSRAKENTEIDEN MITOITUSSÄÄNNÖT.....	12
	TAIPUMAT	20
	LUJUUDEN KOHOAMINEN KYLMÄMUOVATUISSA PROFIILEISSA	21
	JATKUVAN LUJITTUMISEN MENETELMÄ (CSM)	21
	LOPPUSANAT	22

Luennoitsijan teksti**Johdanto**

- 2 Nancy Baddoo, Steel Construction Institute, Lontoo/UK, on
 3 laatinut "Ruostumattomien käyttö kantavissa rakenteissa
 4 suunnittelukäsikirjan" neljännen painoksen uudistetun tekstin osana
 komission rahoittamaa RSCF-projektia, jonka tavoitteena oli edistää
 voimassa olevan rosteri-eurokoodin EN 1993-1-4+A1:2015
 mitoitussääntöjen tunnettuutta ja käyttöä sekä esitellä käynnissä
 olevassa standardin revisiossa ehdotettuja "uusittuja"
 mitoitussääntä ja niiden taustoja. Projekti tunnetaan nimellä PUREST.
 Suomalaisista yrityksistä rahoittajina olivat Outokumpu Stainless Oy
 ja Stalatable Oy. Suomalainen projektipartneri oli
 Teräsrakenneyhdistys ry / Pekka Yrjölä. Projektin suomenkielistä
 materiaalia voi tiedustella Teräsrakenneyhdistyksestä.

Käsikirjan neljäs painos on kolmannen painoksen täydellinen tarkistus; suurimmat muutokset ovat seuraavat:

- ♣ Yhdenmukaistaminen standardin EN 1993-1-4 ja sen vuonna 2015 julkaistun täydennyksen (amendment) A1 kanssa. Voimassa oleva rosterieurokoodi tämän esityksen julkaisuhetkellä on SFS-EN 1993-1-4+A1,
- ♣ Ferriittisten ruostumattomien terästen (RFSR-CT-2010-00026) rakenteellisten sovellusten perusteella ferriittisten ruostumattomien teräslajien ja mitoitusohjeiden sisällyttäminen,
- ♣ Uusia tietoja ruostumattomien terästen palotilanteen termisistä- ja mekaanisista ominaisuuksista lisätään,
- ♣ Suunnittelutietous, mitoitussäännöt ja viittaukset nykyisiin eurooppalaisiin standardeihin, mukaan lukien EN 10088, EN 1993 ja EN 1090, on päivitetty,
- ♣ Uusi liite lisääminen materiaalimallista,
- ♣ Uusi liite, jossa annetaan menetelmäprofiilin kylmämuovauksen aiheuttaman korotetun lujuuden laskemiseksi,
- ♣ Uusi liite, jossa annetaan mitoitusohje, joka hyödyntää materiaalin myötölujuutumisen jatkuvan lujuutumisen menetelmässä.

Design Manual for Structural Stainless Steel



Contents

The goal of this presentation is to give you a brief overview of the key facts about stainless steel along with (new) important design rules. In terms of design approaches, the comparison with carbon steel is made.

For a more complete overview of design rules please download the Design Manual.

Contents

- What is stainless steel
- Grades and Grade Selection Procedure
- Properties of Stainless Steel
- Stainless Steel Design Rules
- Strength enhancement of cold formed sections
- Continuous strength method (CSM)

Käsikirja sisältää viisitoista mitoitusesimerkkiä, joissa esitetään mitoituskäytön käyttö erilaisille rakennedetaljeille. Opiskelijoille olisi erittäin hyödyllistä laskea esimerkit uudelleen ja arvioida saamia tuloksia.

Käsikirjan kommenttiosa (Commentary) esittää runsaasti tutkimusaineistoa, jonka avulla suunnittelijat voivat arvioida suosituksena esitettyjen mitoituskäytön perusteet. Se myös helpottaa mitoituskäytön kehittämistä, kun lisää tutkimusaineistoa tulee saataville.

Lopuksi on kehitetty apps (sovellus) PC:lle, iOS:lle ja Android-laitteelle, jonka avulla käyttäjät voivat helposti laskea ruostumattoman teräksen kestävyksiä standardin EN 1993-1-4 ja suunnittelukäsikirjan mukaisesti. Rakennneosat voidaan valita standardituotteista tai voidaan käyttää itse määriteltyjä profiileja.

Mitä on ruostumaton teräs?

- 6 Ruostumaton teräs on kromin, nikkelin, raudan ja hiilen seos.
7 Kromipitoisuus vaihtelee välillä 10,5-30 %. Terästyypit erotellaan
8 toisistaan mikrorakenteen perusteella. Ruostumaton teräs voidaan jakaa neljään tyyppiin: martensiittinen, ferriittinen, austeniittinen ja duplex (austeniittis-ferriittinen). Kaikkia ruostumattomia terästyyppejä ei kuitenkaan käytetä rakentamisen kohteissa. Materiaalin seostus määrittelee teräksen kemialliset, fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet.

Ferriittiset, martensiittiset, austeniittiset ja duplex-ruostumattomat teräkset tarkemmin:

Ferriittinen: Ruostumaton teräs, jossa kromi on tärkeimpänä seosaineena. Suurin hiilipitoisuus on rajoitettu 0,1 prosenttiin ja kromin määrä on 10,5 - 18%. Nikkeliä ei ole lainkaan tai sitä on hyvin vähäisessä määrin. Niillä on tilakeskinen kuutiollinen hilarakenne kuten rakenneteräksilläkin. Niiden hinta on yleensä edullisempi kuin vastaavan korroosionkestävän austeniittisen teräslajin, sekä myös niiden hinnanvaihtelut ovat vähäisempiä. Niiden sitkeys on heikompi ja niiden hitsaus on vaativampaa kuin austeniittisten ruostumattomien teräslajien.

Duplex: On pääasiallisesti kromia ja nikkeliä sisältävä seos. Kromin määrä on 20 - 26%, mikä on suurempi kuin nikkelin määrä. Nikkelin määrä on noin 1-8%. Muita seosaineita ovat molybdeeni 0,05-5% ja typpi 0,05-0,3%. Duplex-ruostumattomilla teräksillä on austeniittinen ja ferriittinen muodostama mikrorakenne, ja siksi niitä kutsutaan myös austeniittis-ferriittisiksi ruostumattomiksi teräksiksi.

Duplex teräksillä on suuri lujuus ja hyvä korroosionkestävyys, mutta materiaalia on vaikeampi työstää. Koska ne seostettu vähäisemmällä määrällä nikkeliä kuin austeniittiset lajit, niiden hintavaihtelu on myös vähäisempää.

Austeniittinen: austeniittinen ruostumaton teräs koostuu kromista, nikkelistä ja joskus molybdeenista. Nikkeli helpottaa austeniittin muodostumista ruostumattomaan teräkseen. Austeniittinen teräs sisältää noin 17 - 18% kromia ja 8 - 11% nikkeliä. Rakenneteräksien tilakeskisestä kuutiollisesta hilarakenteesta poiketen austeniittisillä ruostumattomilla teräksillä on



pintakeskinen kuutiollinen hilarakenne. Tämän vaikutuksesta austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat paremman korroosionkestävyyden lisäksi ovat sitkeämpiä, helposti kylmämuovattavia ja helposti hitsattavia.

Martensiittinen: Martensiittisilla-ruostumattomilla teräksillä on samanlainen tilakeskinen kuutiollinen hilarakenne kuin ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä ja rakenneteräksillä, mutta niiden korkeamman hiilipitoisuuden ansiosta niitä voidaan lujittaa lämpökäsittelyllä. Martensiittisen ruostumattoman teräksen käyttö rakenteissa on hyvin vähäistä.

Kaikilla ruostumattomilla terästyypeillä on kyky muodostaa itsensä-korjaava suojaava oksidikalvo. Tämä oksidikalvo antaa paremman korroosionkestävyyden verrattuna rakenneteräkselle.

- 9 Ruostumattomia teräksiä on käytetty rakentamisen käyttökohteisiin aina niiden keksimisen jälkeen. Niillä on hyvä korroosionkestävyys ja ne soveltuvat hyvin sovelluksiin, joita on vaikea tarkastaa ja huoltaa käytön aikana. Korroosionkestävyys perustuu ruostumattoman teräksen pintaan itsestään muodostuvaan passiivikalvoon.

Ruostumattomia teräksiä on saatavana useilla erilaisilla pinnan viimeistelyillä. Ruostumattomia teräsrakenteita voidaan valmistaa käyttämällä konepajoissa yleisesti saatavilla olevia menetelmiä ja ne ovat täysin kierrätettäviä niiden käyttöänsä lopussa. Niillä on hyvät lujuus, sitkeys ja väsymysominaisuudet.

Ruostumattoman teräksen on helposti puhdistettavissa, joten niitä käytetään yleisesti elintarvike- ja juomateollisuuden sekä catering-laitteissa. Ruostumattomien terästen tavanomaisesta käytöstä ei ole todennettua terveysriskiä.

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat ei-magneettisia, mutta kylmämuokkauksen vaikutuksesta ne voivat tulla hiukan magneettisiksi.

Why use stainless steel?

- Corrosion resistance and long life
- Maintenance and inspection is difficult
- Attractive metallic surface
- Hygienic properties
- Non-magnetic properties
- Good toughness at very low temperatures

© 2014 Pearson Education, Inc. All rights reserved. This work is derived from Pearson Education, Inc. 2014.

- 10 Kun kromipitoisuus on yli 10,5%, teräksen pinta on puhdas ja ase on alttiina ympäröivälle ilmalle tai muulle hapettavalle ympäristölle, teräksen pintaan muodostuu itsestään läpinäkyvä ja tiivis runsas krominen oksidikalvo. Jos teräspintaa naarmutetaan tai muulla tavoin vahingoitetaan oksidikalvoa, se uudistuu välittömästi hapen läsnä ollessa. Vaikka kalvo on hyvin ohut, noin 5×10^{-6} mm, se on sekä stabiili että tiivis. Niin kauan kuin ruostumaton teräs on riittävän korroosionkestävä käyttöympäristössään, se ei reagoi ympäristön olosuhteiden kanssa. Tästä syystä oksidikalvoa kutsutaan passiivikalvoksi. Tämän passiivikalvon stabiilisuus riippuu ruostumattoman teräksen seostuksesta, sen pintakäsittelystä ja käyttöympäristön syövyttävyydestä. Passiivikalvon stabiilisuus kasvaa, kun kromipitoisuus kasvaa ja sitä edelleen tehostetaan lisäämällä seosaineina molybdeenia ja tyyppeä.

Passive film

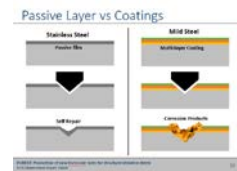
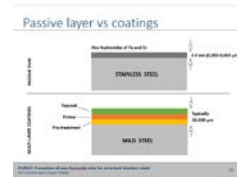
The natural formation of a passive surface film is the key to the corrosion resistance of stainless steels.

Properties of the passive film:

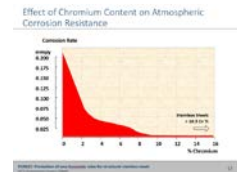
- Chromium rich oxide
- Very thin, ~10-10 Angstroms (2-3 nm)
- Extremely adherent
- Porous
- Self-healing (within minutes)

© 2014 Pearson Education, Inc. All rights reserved. This work is derived from Pearson Education, Inc. 2014.

- 11 Kun verrataan passiivikalvoa monikerrospinoitteeseen, havaitaan passiivikalvon olevan huomattavasti ohuempi ja läpinäkyvä.
- 12 Paksuus on 2-3 nm (0,002-0,003 μm) verrattuna monikerrospinoitteen paksuuteen 20-200 μm . Jos passiivikalvo on vaurioitunut, se korjautuu itsestään. Monikerroksisen suojajärjestelmän tapauksessa vaurio aiheuttaa korroosiota vaurioituneelle alueelle. Kuten kuvissa on esitetty.



- 13 Korroosionopeus (mmpy = millimetriä vuodessa) on esitetty y-akselilla ja vastaavasti kromipitoisuus (%) x-akselilla. On selvää, että kromipitoisuuden ollessa yli 10,5% ruostumattoman teräksen korroosiota ei juurikaan tapahdu tavanomaisessa ilmastolosuhteissa.



Onko ruostumaton teräs koskaan tahrautunut (staining) tai syöpynyt?

No kyllä tällaisiakin tapauksia on tiedossa. Jos teräslaji valitaan käyttöympäristöön väärin perustein, rakenteen käyttöympäristä on oletettu väärin tai altistusolosuhde muuttuu käyttöiän aikana tai jos rakenneosaa ei puhdisteta ohjeistuksen mukaisesti, jotkut teräslajit voivat olla alttiita paikalliselle korroosiolle. Kuitenkin useimmissa tavanomaisissa käyttöympäristöissä ruostumaton teräs on korroosionkestävä. Silti paikallinen korroosio voi esiintyä seostuksesta ja käyttöympäristöstä riippuen. Erilaisia korroosimuotoja ovat:

- ♣ Yleinen korroosio (Tasainen): Ei tapahdu tavanomaisissa ympäristöissä eikä rakenteellisissa sovelluksissa käytettävien teräslajeilla.
- ♣ Pinnan tahrautumien (staining): Voi esiintyä vähän seostuissa (lean) seoksissa useissa käyttöympäristöissä. On kosmeettinen haitta mutta ei vaikuta rakenteosan eheyteen.
- ♣ Pistekorrosio: Riski kasvaa kloridipitoisuuden kasvaessa vähemmän seostetuilla teräslajeilla. On yleensä kosmeettinen haitta ja yleensä ei vaikuta rakentamisessa käytettävän rakenneosan eheyteen.
- ♣ Rakokorroosio: Riski kasvaa kloridipitoisuuden kasvaessa vähemmän seostetuilla teräslajeilla. Vaatii erittäin ahtaita rakoja (<0,25 mm) ja että rakenneosa on pitkiä aikoja kosteana. Mahdollisesti rakokorroosio voi olla vakava rakenneosan kestävyden kannalta.
- ♣ Jännityskorroosio (SCC): vetojännityksen, kloridien ja lämpötilan vaikutuksesta muodostuu riski korroosimuodolle. Yleisimmät vähän seostetut austeniittiset laadut ovat alttiimpia. Mahdollisesti korroosimuoto on erittäin vakava kestävyden kannalta. Esimerkkeinä uimahallien vetorasitetut rakenneosat, materiaalin valinta, katso käsikirja kohta 3.5.3.
- ♣ Bimetallinen korroosio: Yleensä "ongelma" muille metalleille: rakenneteräs, sinkki ja alumiini syöpyvät ruostumattomasta

teräksestä. Rakenneteräs on yleensä maalattu, jossa maalipinta muodostaa eristeen ruostumattoman ja rakenneteräksen välille.

♣ Pinnan kontaminaatio: Epäpuhtaudet voivat vaikuttaa pinnan suojaavaan oksidikerrokseen

♣ Hitsauksen lämpövärijämyä: On ruostumattoman teräksen luonnollisen oksidikalvon paksuuntuminen. Usein tämä havaitaan hitsin muutosvyöhykkeillä. Kun hitsauksen lämpövärijämyä muodostuu, tähän kromi otetaan alla olevasta ruostumattomasta teräksestä. Siten lämpövärijämyän alla olevan alueen korroosionkestävyys voi olla muuta materiaalia heikompi.

Edellä esitettyjen korroosionmuotojen ja käyttöympäristön vaikutuksen vuoksi on olennaista valita tiettyyn käyttöympäristöön soveltuvan seostuksen sisältävä ruostumaton teräslaji.

Käytännön sovellukset

15 Kustannusnäkökohdat

16 Ruostumaton teräs on alkuinvestointina kalliimpaa kuin
17 rakenneteräs.

Ruostumattoman teräksen hinta on myös herkempi vaihtelulle, koska se riippuu nikkelin hinnasta.

Koko elinkaarikustannus tulee ottaa huomioon, koska eliniän aikana ruostumattomalle teräsrakennelosalle tarvitaan vähemmän huoltoa. Elinkaarikustannusanalyysit osoittavat, että ruostumaton teräs voi olla edullisin vaihtoehto verrattuna materiaaleihin, jotka vaativat enemmän huoltoa.



Teräslajit ja teräslajin valintamenettely

19 Harjoitus: Koeta analysoida seuraavien teräslajien nimi:

- 1.4301
- 1.4162
- 1.4016



20 Standardissa EN 1993-1-4+A1 on esitetty menetelmä soveltuvan
21 austeniittisten ja duplex-ruostumattomien teräslajien valitsemiseksi
22 tiettyyn ilmastokorroosioympäristöön. Tätä menetelmää voidaan
23 soveltaa Euroopassa vallitseville ilmasto-olosuhteille. Menettelyssä
24 ei oteta huomioon:

- Teräslaji / tuotteen saatavuus,



- 25
- pintakäsittelyvaatimukset, esimerkiksi arkkitehtonisista tai hygieenisistä syistä,
 - kiinnityksiä.

Menettelyssä oletetaan, että seuraavat vaatimukset täyttyvät:

- Käyttöympäristö on lähes neutraalilla pH-alueella (pH 4 - 10),
- Rakenteelliset osat eivät suoraan altistu kemikaaleja sisältävälle prosessille tai ole osa sitä,
- Käyttöympäristö ei ole pysyvä tai usein tapahtuva upotus meriveteen.

Jos nämä ehdot eivät täyty, on syytä pyytää asiantuntija-apua.

Menettelyyn kuuluu seuraavat vaiheet:

Korroosionkestävyystekijän (CRF) määrittäminen tiettyyn ympäristöön (taulukko 3.3);

Korroosionkestävyysluokan (CRC) määrittäminen korroosionkestävyystekijän (CRF) perusteella (taulukko 3.4).

Korroosionkestävyystekijä koostuu kolmesta osasta ja se lasketaan seuraavasti:

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3$$

Jossa:

F1 = Merestä lähtöisin olevalle suolaveden vaikutukselle tai jäänestosuoloille altistumisriski

F2 = Rikkioksidille altistuminen

F3 = Säännöllinen puhdistus tai altistuminen sateen pesuvaikutukselle

Katso suunnittelukäsikirjan taulukko 3.3.

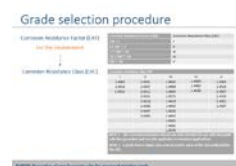
Kun CRF on määritetty, korroosionkestävyysluokka määritetään suunnittelukäsikirjan avulla.

Korroosionkestävyysluokan (CRC)perusteella voidaan valita sopivat ruostumattomat teräslajit sovellukseen taulukon 3.5 avulla Suunnittelukäsikirjassa.

Materiaalivalinta uimahalliympäristöihin, katso suunnittelukäsikirjan kohta 3.5.3.

Menetelmä ferriittisten ruostumattomien terästen valitsemiseksi, ks. Suunnittelukäsikirjan kohta 3.5.4.

Basic ferritics
Basic austenitics
Mo austenitics
Lean duplexes
Higher alloy/super austenitics
Duplex/super duplex



Increasing alloy additions, i.e. more corrosion resistant →

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

NOTE 1 The Corrosion Resistance Classes are only intended for use with this grade selection procedure and are only applicable to structural applications.
NOTE 2 A grade from a higher class may be used in place of the class indicated by the CRF.

Ruostumattoman teräksen ominaisuudet

27 Lujuus

28 Mitoituslaskelmissa ominaislujuus f_y ja ominaislujuus f_u otetaan vähimmäisarvona 0,2% rajalle ($R_{f0,2}$) ja vetolujuudelle (R_m), jotka on annettu EN 10088-4: n ja 5 (ks. suunnittelukäsikirjan taulukko 2.2). Nämä arvot soveltuvat materiaalille hehkutetussa tilassa, ja siksi ne ovat konservatiivisia materiaaleille tai profiileille, jotka on valmistettu kylmämuovaamalla. Rakenteelliset profiilit toimitetaan harvoin hehkutetussa tilassa.

Mechanical characteristics

Strength

Minimum of strength

Other parameters

Min. Specified Mechanical Properties

Grade	Strength	Stoichiometry	Minimum of strength
1.4003 & 1.4016	200	40	200,000
1.4301 & 1.4307	220	40	220,000
1.4311 & 1.4318	240	40	240,000
1.4306	240	40	240,000
1.4401 & 1.4404	260	40	260,000
1.4435 & 1.4439	280	40	280,000
1.4462	280	40	280,000
1.4512	280	40	280,000
1.4539	280	40	280,000
1.4541	280	40	280,000
1.4565	280	40	280,000
1.4571	280	40	280,000
1.4578	280	40	280,000
1.4662	280	40	280,000
1.4362	280	40	280,000
1.4062	280	40	280,000
1.4162	280	40	280,000

Nominal values of Mechanical Properties

Kimmomoduli

Rakenteen suunnittelussa suositellaan, että kaikkien ruostumattomien terästen kimmomodulin arvona käytetään $E = 200 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$

Rakenneteräksen arvo on $E = 210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$.

HUOMAUTUS: EN 1993-1-4 ja EN 10088-1 antavat $200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ arvon kimmomoduilille kaikille austeniittisille ja duplex-teräslajeille, joita tyypillisesti käytetään rakenteellisissa sovelluksissa. Ferriittisille teräslajeille on voimassa olevassa rosterieurokoodissa annettu arvo $220 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$. Kuitenkin ferriittisten ruostumattomien teräslajien tutkimusaineisto osoittaa, että arvo $200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ on koetuloksien kanssa yhtäpitävä ja siksi EN 1993-1-4 -standardin seuraavassa revisiossa on ehdotettu, että tätä arvoa käytetään rakennesuunnitteluun kaikille ruostumattomille teräslajeille.

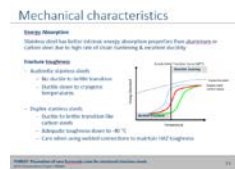
Muut suureet

Poissonin vakiolle käytetään arvoa 0,3, joka on sama kuin rakenneteräkselle. Leikkausmoduulille G käytetään arvoa $76,9 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$.

Kuva 28 antaa yleiskuvan ruostumattoman teräksen ominaisuuksien vähimmäisarvot EN 10088 -standardin mukaisesti. Ominaisuudet ovat "hehkutetun tilan" lujuuksia (pehmeä tila).

30 Energia-absorptio

Ruostumaton teräs on ominaisuuksiltaan paremmin energiaa absorboiva kuin alumiini tai rakenneteräs, johtuen voimakkaasta myötölujittumisesta ja erinomaisesta sitkeydestä.



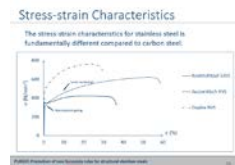
Iskusitkeys

- Austeniittiset ruostumattomat teräkset
 - Ei omaa sitkeä-hauras transitiolämpötilaa
 - säilyttää sitkeytensä kryogeenisissä lämpötiloissa
- Duplex ruostumattomat teräkset
 - sitkeä-hauras transitiolämpötila kuten rakenneteräksilläkin
 - riittävä sitkeys -40 C asti
 - erityinen huolellisuus hitsattaessa, jotta HAZ-alueen sitkeys säilyy

Sitkeä = hyvä muodonmuutoskyky vetojännityksen vaikuttaessa

Hauras = heikko muodonmuutoskyky ja murtuu äkillisesti vetojännityksen vaikuttaessa.

31 Rakenneteräksen ja ruostumattoman teräksen olennainen ero on jännitys-venymä-kuvaajan erilainen muoto, kuten kuvassa on esitetty. Rakenneteräs (oranssi käyrä) käyttäytyy lineaarisesti selvästi havaittavaan myötöpisteeseen asti, minkä jälkeen venymä kasvaa jännityksen kasvaessa vain hyvin vähän. Ruostumaton teräs taas myötää vähitellen jännityksen kasvaessa, ja myötörajaa suuremmilla jännityksillä myötölujittuu voimakkaasti (vihreä käyrä).



Ruostumattoman teräksen jännitys-venymäominaisuudet eroavat olennaisesti rakenneteräksestä:

- Epälineaarinen jännitys-venymä-yhteys. Tämä aiheuttaa:
 - Erilainen nurjahduskäyttäytyminen puristuksessa ja taivutuksessa
 - suuremman taipumat
- Voimakas myötölujittuminen (kutsutaan myös kylmämuokkautumiseksi)

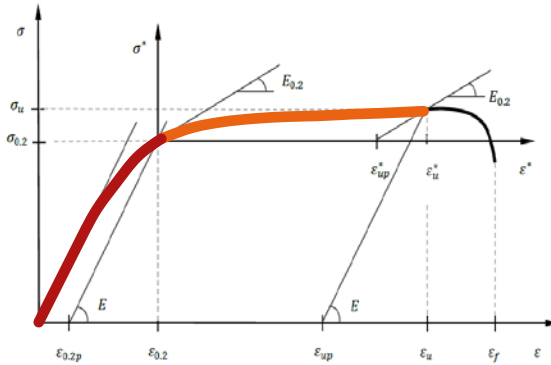
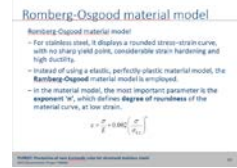
Lisäksi ruostumattoman teräksen lujuusominaisuuksille on ominaista:

- epäsymmetria (puristus/veto)
- Anisotropia. (valssaussuunta/poikittain valssaussuuntaan)

Anisotropia = Ominaisuudet riippuvat kuormituksen suunnasta, joten erilaisia ominaisuuksia voi olla tarpeen käyttää riippuen onko kuormitus valssaussuuntaan tai poikittain valssaussuuntaa vasten).

Rakenteellisen kestävyuden näkökulmasta materiaalin anisotropia ja epäsymmetria eivät kuitenkaan ole yhtä merkittäviä kuin materiaalin epälineaarisuus.

32 Mitoituslaskelmissa tarvitaan jännitys-venymä-kuvaajan approksimaatio. Kimmoinen, ideaali-plastinen jännitys-venymä-yhteys ei ota huomioon materiaalin myötölujittumisen edullista vaikutusta rakenneosan kestävyYTEEN. Siksi Ramberg-Osgood -materiaalimallia käytetään jännitys-venymä-käyrän yksinkertaistamiseksi.



$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \epsilon_{0.2} + \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m & \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases}$$

Austenitiittisten ja duplex-teräslajien jännitys-venymä-yhteys voidaan kuvata edellä mainituilla yhtälöillä. (Yhtälöt eivät sovellu ferriittisille). Jotta kaikille teräslajeille voidaan määrittää optimaaliset kuvaajat, tarvitaan lisää tutkimusaineistoa.

Yli 1000 vetokoeaineiston analysointi osoittaa, että:

- EN1993-1-4: n liitteessä C esitetty materiaalimalli on soveltuva yksinkertaistus kaikille ruostumattomille teräksille.

Myötölujittumisen parametrit:

Ferriittiset: vähemmän sitkeällä käyttäytymisellä heikompi myötölujittuminen

$$n = \frac{\ln 20}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}} \right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad \epsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E}$$

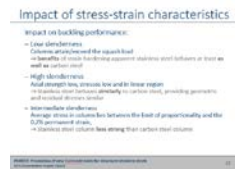
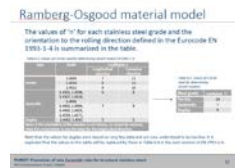
$$n = \frac{\ln 4}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.05}} \right)} \quad m = 1 + 2.8 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad \epsilon_u = 0.6 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \right) \quad \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.46 + 145 \frac{\sigma_{0.2}}{E}$$

UUDET EHDOTUKSET

- 33 Kerroin "n" on määritetty suhteellisuusrajan ja myötörajan perusteella
34 ja se on siis mittari jännitys-venymä-kuvaajan epälineaarisuudesta.
Mitä pienempi suureen "n" arvo, sitä epälineaarisempi on jännitys-venymä-yhteys. Arvo riippuu seuraavista tekijöistä:

- ruostumaton terästyypistä,
- valmistusmenetelmästä,
- kylmämuokkauksen asteesta ja
- kuormitussuunnasta (veto/puristuskuormitus)

Standardi EN 1993-1-4+A1 antaa tällä hetkellä arvot "n", jotka ovat riippuvaisia ruostumattoman teräksen tyyppistä ja suunnasta valssaussuuntaan nähden (taulukko 6.5). Huomaa, että duplex-terästen arvot perustuivat vähäiseen testiaineistoon 2000-luvun alussa standardia kirjoitettaessa ja niitä pidetään nyt liian alhaisina. Tämän taulukon arvot on ehdotettu korvattaviksi käynnissä olevassa EN 1993-1-4 -standardin revisiossa taulukon 6.4 mukaisiksi.



- 35 Ruostumaton teräs on epälineaarinen materiaali, jossa ei ole selkeästi
36 havaittavaa myötöpistettä, vaan sen sijaan vähitellen myötäävä käyttäytyminen ja merkittävä myötölujittuminen. Selkeän myötöpisteen sijaan ruostumattoman teräksen myötölujuus määräytyy 0,2% pysyvää venymää vastaavana jännityksenä.

Kuormitettaessa materiaalia plastiselle alueelle ja sen jälkeinen kuormituksen poistaminen johtaa materiaalissa pysyvään muodonmuutokseen ja materiaalin muokkauslujittumiseen. Muokkauslujittumista voi ilmetä:

- Levymateriaalin valssauksen yhteydessä (terästehtaalla)
- Profiilin valmistuksen yhteydessä (profiilin valmistajan kylmämuovauslinjoilla))
- Kuormituksen aikana (käytössä kuormituksen vaikuttaessa)

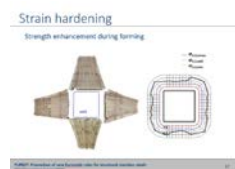
Uudelleen kuormitettaessa kimmoinen alue on laajentunut ja myötölujuuden arvo kohonnut. Tämä on myötölujittumisen vaikutuksesta korotettu myötölujuus. Materiaalin sitkeys heikkenee, mutta hehkutetun ruostumattoman teräksen sitkeys on erittäin korkea lähtötilanteessa eikä merkittävästi heikkene kylmämuokkauksessa ja kylmämuovattujen rakenneosien sitkeys on hyvä.

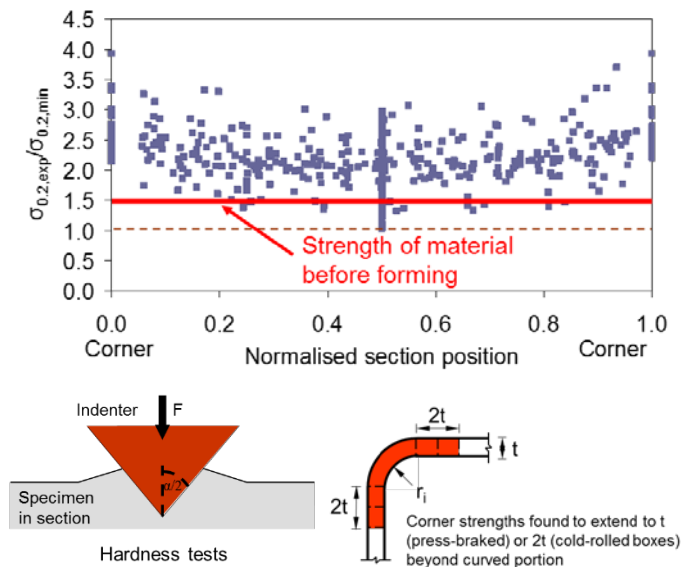


- 37 Piikkomalla profiilin poikkileikkaus pituussuuntaiseksi vetokoesauvoiksi, voidaan määrittää profiilin poikkileikkauksen joka kohdan jännitys-venymä-käyttäytyminen.

Seuraavat johtopäätökset voidaan tehdä nelikulmaisille rakenneputkille:

- Rakenneputkien tasomaisten osien korotetun myötölujuuden määrittämiseksi on kehitetty laskentayhtälöt, jotka on todennettu laajalla koeaineistolla.
- Rakenneputken nurkka-alueiden voimakkaasti lujittunut alue on todennettu kovuuskokeiden avulla.





Afshan, S., Rossi, B. and Gardner, L. (2013). Strength enhancements in cold-formed structural sections – Part I: Material testing. *Journal of Constructional Steel Research*. 83, 177-188.

Rossi, B., Afshan, S. and Gardner, L. (2013). Strength enhancements in cold-formed structural sections – Part II: Predictive models. *Journal of Constructional Steel Research*. 83, 189-196.

Cruise, R. B. and Gardner, L. (2008). Strength enhancements induced during cold forming of stainless steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 64(11), 1310-1316.

Ruostumaton teräs on saatavana standardin mukaisesti kylmämuokatussa tilassa. Standardin EN 1993-1-4+A1 mitoitussääntöjä ja suunnittelukäsikirjaa voidaan soveltaa kylmämuokatussa tilassa olevalle materiaalille:

CP350: $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$

CP500: f_y redusoidaan arvoon 460 N/mm^2 , joka ottaa huomion epäsymmetrian ja anisotropian

Plastinen muodonmuutos kylmämuovauksen vaikutuksesta voi kohottaa huomattavasti lujuusarvoja. Suunnittelukäsikirjan liitteen B mukaisesti mitoituksessa voidaan kohonnut lujuus ottaa huomioon.

Mitoitusyhtälöissä myötölujuus f_y korvataan keskimääräisellä korotetulla myötölujuudella f_{yA} .

Muokkauslujuutumisen vaikutuksesta kohonnut lujuus voidaan ottaa huomioon suunnittelussa käyttäen jatkuvan lujuuden menetelmää, kuten liitteessä D on esitetty.

38 Myötölujuuttuminen ei ole kuitenkaan aina suosittava ominaisuus:

- rakenneosien muotoiluun vaaditaan raskaampia ja tehokkaampia työstökoneita, koska vaaditaan suurempia voimia,
- heikentynyt sitkeys (kuitenkin alkuperäisen sitkeys on korkea erityisesti austeniittisille teräslajelle),
- voi aiheuttaa jäännösjännityksiä.

Strain hardening

Strain hardening is not always useful.

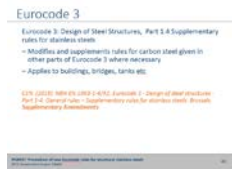
- Heavier and more powerful fabrication equipment since greater forces are required.
- Reduced ductility (however, the initial ductility is high, especially for austenitic grades).
- Undesirable residual stresses may be produced.

© 2004 Blackwell Publishing Ltd, *Structural Steel Design*, 2nd Edition, 112

Sitkeyden väheneminen ei kuitenkaan ole ongelma austeniittisille teräslajeille, koska niillä on erittäin hyvä sitkeys jo ennen kylmämuokkausta.

Ruostumattomien teräsrakenteiden mitoitusäännöt

40 Ruostumattomien terästen rakenteellista mitoitusta käsittelee eurokoodi 3 osa 1.4, EN 1993-1-4. Se täydentää muita EN 1993-1 osia ottamalla huomioon ruostumattomien terästen erityispiirteet ja sisältää siten joitain mitoitusyhtälöitä, jotka poikkeavat rakenneterästen mitoitusyhtälöistä. Mitoitusmenetelmät esitetään yleensä rakenneteräkselle esitetyllä tavalla. Tämä helpottaa ruostumattomien terästen käyttöönottoa, koska rakennesuunnittelijoilla on kokemusta rakenneterästen mitoituksesta eurokoodeilla.



41 Ruostumattomien terästen mitoituksen osalta yksi olennainen ero ovat kestävyysluokkien osavarmuusluvut. Ruostumattomasta teräksestä tulisi käyttää seuraavia tekijöitä

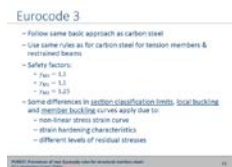
$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

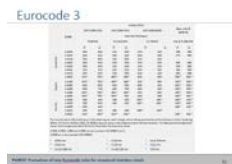
Osavarmuusluvun arvot eroavat rakenneterästen vastaavista.

Osavarmuusluvut ovat eurokoodin kansallinen valinta ja niiden arvot esitetään käyttökohtamaan eurokoodin kansallisessa liitteessä (esim. NA SFS-EN 1993-1-4).



42 Taulukossa annetaan standardin EN 10088 mukaisesti materiaalin myötölujuuden f_y ja murtolujuuden f_u nimellisarvot yleisimmän käytössä oleville ruostumattomille teräksille.

Katso suunnittelukäsikirjan taulukko 2.2.



43 Puristettujen ohutseinämäisten levykenttien käyttäytymiseen vaikuttaa stabiilisuuden menettäminen levykentän paikallisen lommahduksen vuoksi. Paikallinen lommahdus estää poikkileikkauksen kimmoteorian mukaisen kestävyysluokituksen saavuttamisen.

Poikkileikkauksen käyttäytymisen arvioimiseksi on kehitetty menetelmä poikkileikkaukseluokitus. Poikkileikkaukseluokka vaikuttaa:

- Analyysityyppiin
- Poikkileikkauksen todentaminen (plastinen kestävyys? kimmoteoriaan mukainen kestävyys?),
- Rakenneosa (haluamme myös tietää, voimmeko hyötyä plastisesta mitoituksesta)



44 Poikkileikkausluokittelua tarvitaan poikkileikkauksen varmentamismenettely osalta:

- kimmoteoriaan perustuva varmentaminen,
- plastisuusteoriaan (tai osittainen plastinen) perustuva varmentaminen
- tehollinen poikkileikkaus (pienennetyt poikkileikkausominaisuudet, A_{eff} ja I_{eff})



Menettely kattaa neljä poikkileikkausluokkaa:

- Luokka 1: poikkileikkaukseen voi muodostua plastinen nivel, poikkileikkauksella on riittävä kiertymiskyky,
- Luokkaan 2 kuuluvat poikkileikkaukset ovat sellaisia, joihin voi kehittyä plastisuusteorian mukainen momentti mutta joilla on rajoitettu kiertymiskapasiteetti paikallisen lommahduksen vuoksi
- Luokan 3 poikkileikkaukset ovat sellaisia, joissa poikkileikkauksen äärimmäisessä reunassa kimmoteorian mukainen puristusjännitys voi saavuttaa myötölujuuden, mutta paikallinen lommahdus estää plastisen momenttikestävyyden saavuttamisen.
- Luokan 4 poikkileikkaukset ovat sellaisia, joissa paikallinen lommahdus tapahtuu ennen kuin myötöjännitys saavutetaan yhdellä tai useammalla poikkileikkauksen osalla.

Poikkileikkausluokasta riippuen plastinen kestävyys voidaan tai ei voida ottaa huomioon. Poikkileikkausluokkien 1 tai 2 profiili voi olla käyttökelpoisin useimmissa tapauksissa. Yleiskatsaus:

- Luokka 1 ja luokka 2 hyödyntää plastisen kestävyden,
- Luokka 3 hyödyntää kimmoteoriaan perustuvan kestävyden,
- Luokassa 4 käytetään tehollisia poikkileikkausominaisuuksia.

Tehollisia poikkileikkausominaisuuksia käytetään:

Levyn puristuksella olevilla alueilla, jolla bruttopinta-ala on A_c , lasketaan tehollinen pinta-ala:

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

missä ρ on pienennyskerroin levyn lommahdukselle. Molemmilta reunoiltaan tuetuille puristetuille taso-osille (kylmämuovatut tai hitsatut) (tämä eroaa rakenneterästen vastaavasta)

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{but } \leq 1,0$$

Yhdeltä reunaltaan tuetuille puristetuille taso-osille (kylmämuovatut ja hitsatut):

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

$\bar{\lambda}_p$ on taso-osan hoikkuus:

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

Parametrin ρ laskentakaava on erilainen ruostumattomille teräksille ja rakenneteräksille. Laskentamenettely näille teräksille on kuitenkin sama.

- 45 Poikkileikkausluokka määritetään kaikille kokonaan tai osittain
46 puristuksella kuormitetuille levy-osille. Poikkileikkausluokka on
riippuvainen levy-osan hoikkuudesta c/t , jota arvioidaan kullekin
47 poikkileikkausluokalle määritettyyn raja-arvoon. Poikkileikkausluokka on levyosien epäedullisin poikkileikkausluokka.

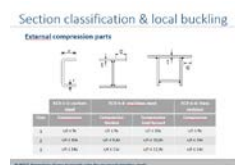
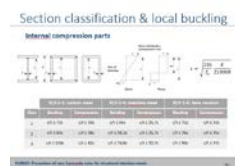
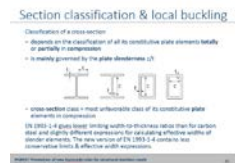
Kaksi olennaista huomiota:

Poikkileikkausluokka = levyosien epäedullisin luokka. Hitsatut, ohutuumaist levypalkit ovat yleensä luokkaan 4 kuuluvia osia!

- Poikkileikkausluokan määrittämiseen vaikuttaa termi $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$. Useat poikkileikkaukset, jotka kuuluvat poikkileikkausluokkaan 3 (semi-kompakti), muuttuvatkin luokkaan 4 kun materiaali vaihdetaan suurempi lujuuksiseen!

Sen jälkeen, kun ruostumattomien terästen poikkileikkausluokkien raja-arvot on määritetty 2000-luvun alussa, ruostumattomien terästen tutkimusaineiston määrä on kasvanut ja tutkimusaineiston analysointitulokset oikeuttavat nyt tarkempien raja-arvojen käytön, jotka raja-arvot yleensä ovat yhdenmukaisia rakenneterästen raja-arvojen kanssa. Nämä raja-arvot on esitetty EN 1993-1-4+A1:ssä.

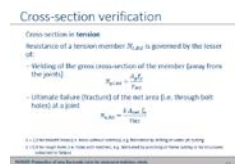
Kalvoissa 46 ja 47 on esitetty raja-arvot hiilliteräkselle ja EN 1993-1-4+A1 mukaisesti ruostumattomalle teräkselle.



48

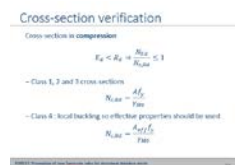


49



- 50 Riippuen sauvan hoikkuudesta, pilarin käyttäytyminen voi olla:

Lyhyiden, kompaktien pilareiden (pieni hoikkuus) käyttäytymistä ohjaavat paikalliset poikkileikkausominaisuudet ja vaurioituminen tapahtuu materiaalin myötäämisellä (squashing). Myötökuorma saadaan $N_y = A f_y$ (pinta-ala x -myötölujuus)



Pitkien hoikkien pilareiden (suuri hoikkuus) käyttäytymistä ohjaavat pilarin mittasuhteet ja vauriomuotona sauvan kimmainen stabiileetin menetys (nurjahdus). Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma on merkitty N_{cr} . Katso myöhemmissä kalvoissa.

51

Cross-section verification

Cross section in bending

$$\eta_d = \eta_e = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

Class 1 and 2 cross sections

$$M_{Rd} = M_{pl,R} = \frac{W_{pl,y}}{\gamma_{M1}} f_{yk}$$

Class 3 cross-sections (local buckling)

$$M_{Rd} = M_{pl,R} = \frac{W_{pl,y}}{\gamma_{M1}} f_{yk}$$

Class 4: local buckling so effective properties should be used

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl,y}}{\gamma_{M1}} f_{yk}$$

52 Suureen A_v laskentakaavat, katso taulukko 5.5 Suunnittelukäsikirjassa.

53

Cross-section verification

Cross section in shear

The plastic shear resistance of a cross section, $V_{Rd,max}$, may generally be taken as:

$$V_{Rd,max} = \left(\frac{A_v f_{yk}}{\sqrt{3}} \right)$$

In which A_v is the shear area

The resistance to shear buckling should also be checked (see later)

Cross-section verification

Welded I, H and box sections, stiff parallel to web

Roll-rolled I and H sections, stiff parallel to web

$$A_v = \sum A_{w,i}$$

$$A_v = A - 2b_f t_f + (2t_w + 2t_f) l_w$$

EN 1993-1-4, Annex A.4, 2.3.2

54

55

Design of columns & beams

In compression, because of the global dimension of the column, the behaviour is affected by instability phenomena. These instabilities often take the form of **GLOBAL** lateral buckling about the weak axis.

Design of columns & beams

Instability of the cross section

→ "P" radius of gyration which is the **considered buckling plane**, A has the dimension of a length [m].

$$i^2 = \frac{I}{A}$$

Member slenderness as

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{i}$$

so that:

$$N_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{E I}{l_{cr}^2}$$

Buckling is governed by the slenderness.

56 Kuvaaja esittää "ideaalisen" pilarin käyttäytymistä. Kuorma-hoikkuus-
57 kuvaajalta havaitaan kaksi aluetta. Myötöalue, jossa profiili vaurioituu
58 myötäämällä ja alue, jolla profiili vaurioituu nurjahtamalla saavuttamatta poikkileikkauksen myötölujuutta.

Pilareiden todellinen käyttäytyminen ei täysin ole teorian mukainen johtuen:

- pilarin alkukäyrydestä
- kuormituksen epäkeskisyydestä
- materiaalin epähomogeenisuudesta
- jäännösjäännityksistä
- ...

Näiden vaikutuksesta mitoitusnurjahduskäyrät ovat teoreettisten käyrien alapuolella tai samalla tasolla.

Design of columns & beams

"Perfect" column behaviour

Two bounds: Yielding (cross section strength) and buckling

Design of columns & beams

"Perfect" column behaviour

Two bounds: Yielding (cross section strength) and buckling

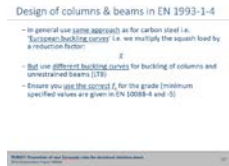
Design of columns & beams

Real column behaviour

Two bounds: Yielding (cross section strength) and buckling

59 Ruostumattomien terästen mitoitus yleensä noudattaa samaa lähestymistapaa kuin rakenneteräksillä, ts. käytetään "eurooppalaisia nurjahduskäyriä". (myötökuorma kertaa nurjahduksen pienennyskerroin). Ruostumattomien terästen nurjahdus- ja kiepahduskäyrät kuitenkin eroavat hiiliterästen vastaavista

Huomaa: Varmista, että käytät teräslajille myötölujuutta standardien EN 10088-4 ja -5 mukaisesti.



60 Puristetun sauvan nurjahduskestävyys $N_{b,Rd}$ lasketaan seuraavasti:

61 Poikkileikkausluokkien 1,2 ja 3 sauvuille:

62
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Poikkileikkausluokan 4 sauvuille:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

missä χ nurjahduksen huomioon otettava pienennyskerroin. Pienennyskerroin voidaan laskea seuraavasti:

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

Dimensioton hoikkuus $\bar{\lambda}$ voidaan laskea:

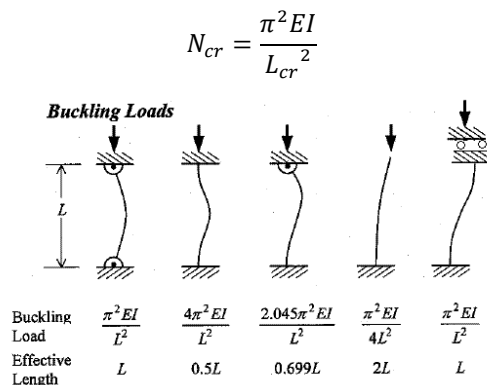
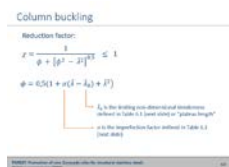
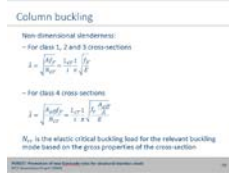
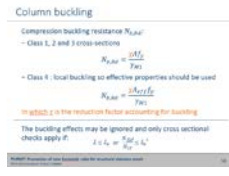
Poikkileikkausluokkien 1,2 ja 3 sauvuille:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sqrt{A f_y}}{N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

Poikkileikkausluokan 4 sauvuille:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sqrt{A_{eff} f_y}}{N_{cr}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{eff}}{A}}$$

N_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma tarkasteltavalle nurjahdusmuodolle perustuen poikkileikkauksen brutto poikkileikkauksen ominaisuuksiin. Suureen N_{cr} laskentakaavassa L_{cr} tarkoittaa sauvan tehollista nurjahduspituutta. Nurjahduspituuden määrittämisen perustuu rakenteiden mekaniikan periaatteisiin ottaen sauvan reunaehdot huomioon.



ja,

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

Ruostumattoman teräksen nurjahduskäyrät ovat samat kuin rakenneteräksen, mutta epätäydellisyystekijän (α taulukko 6.1) ja dimensioton rajahoikkuus ($\bar{\lambda}_0$ taulukko 6.1, "plateau length") eroavat.

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen rakenneosien nurjahdus voidaan jättää huomiotta, ja vain poikkileikkaustarkastuksia sovelletaan, jos:

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

63

64

Column buckling

Choice of buckling curve depends on cross section, manufacturing route and axis.

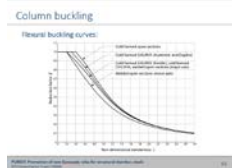
Section	Axis	Class	Curve	α	$\bar{\lambda}_0$
IPE	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
HE	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
H	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
S	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
T	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2

Choice of buckling curve depends on cross section, manufacturing route and axis.

The buckling curve given in Table 6.1 is used to determine the value of α in the formula $\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$. This is the same regardless of the type of cross section. The value of $\bar{\lambda}_0$ is given in Table 6.1. Buckling curves for cold formed steel sections are not defined below sections are defined below. The value of $\bar{\lambda}_0$ is given in Table 6.1. Buckling curves for cold formed steel sections are not defined below. The value of $\bar{\lambda}_0$ is given in Table 6.1.

Section	Axis	Class	Curve	α	$\bar{\lambda}_0$
C	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
Z	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2

65 Erialaisten poikkileikkausten nurjahduskäyrät on esitetty kuvassa.



66 Verrataan rakenneteräksestä ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja pilareita, joilla on samankaltaiset ominaisuudet.
67 Ruostumattoman teräspilarin mitoitus on EN 1993-1-4 ja
68 suunnittelukäsikirjan mukaan. Materiaalien välillä eroa aiheuttaa rajahoikkuus $\bar{\lambda}_0$.

Example: Flexural buckling

Cold formed rectangular hollow section submitted to concentric compression

Section	Axis	Class	Curve	α	$\bar{\lambda}_0$
C	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
Z	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2

Example: Flexural buckling

Section	Axis	Class	Curve	α	$\bar{\lambda}_0$
C	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
Z	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2

Esimerkissä rakenneteräksen ja ruostumattoman teräksen kestävyys suhteen ovat samat.

Muokkauslujittumisen vaikutuksesta korotettu myötölujuus (liite B suunnittelukäsikirjassa) ja myötölujittuminen jatkuva lujittumisen menetelmää (liite D suunnittelukäsikirjassa) käytettäessä voidaan ottaa huomioon, vaikka tässä esimerkissä näitä ei otettu huomioon.

Example: Flexural buckling

Comparison:

Section	Axis	Class	Curve	α	$\bar{\lambda}_0$
C	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2
Z	Major	C1	a	0,21	0,2
	Minor	C2	b	0,34	0,2

In this example, α and $\bar{\lambda}_0$ show similar resistance to flexural buckling. In benefits of strain hardening not apparent EC3 1-4 doesn't take duty account for strain hardening/old-working.

69 Palkit, joiden puristuslaipan kiertymä on vapaa ja se voi siirtyä sivusuunnassa, ovat tukemattomia palkkeja. Sivusuunnassa tukemattomat palkit saattavat vaurioitua kiepahtamalla (LTB).
70
71 Taivutuskuorma voi aiheuttaa puristetun laipan kiertymistä ja

Lateral torsional buckling (LTB)

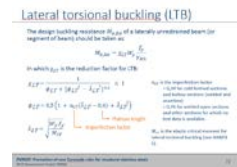
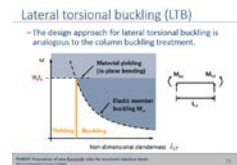
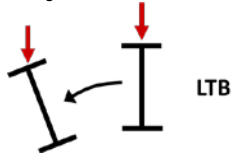
Can be discounted when:

- Members subject to bending only about the minor axis.
- Members with sufficient restraints to the compression flange throughout their length to prevent twisting.
- Members subject to lateral-torsional restraint throughout.

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,9 \quad \text{or} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,9$$

Members with certain types of cross sections, such as I-sections or channel sections, which are not susceptible to lateral torsional buckling.

siirtymän sivusuunnassa. Rakenteessa on vauriomuotoa kiepahdus



Seuraavissa tapauksissa kiepahdusta ei tarvitse tarkastella:

- Palkit, jotka on taivutettu vain pienemmän akselin suhteen,
- Palkit, joilla on riittävä tuenta puristuslaipalle koko niiden pituudella,
- □ palkit, joissa sivuttaisen epäsuoruuksien hoikkusuunnassa

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \text{ tai } \frac{M_{Ed}}{M_{Cr}} \leq 0,16$$

- Palkit tietyillä poikkileikkausmuodoilla, kuten poikkileikkaukseltaan neliömäiset tai ympyränmuotoiset rakenneputket, jotka eivät ole alttiita kiepahdukselle.

Kaikkien muiden palkkien kiepahduskestävyys tarkistetaan.

Kiepahduskestävyyden määrittäminen on samanlainen pilarin nurjahdusmäärittämisen kanssa. Kiepahduskestävyys lasketaan käyttämällä $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

$W_y = W_{pl,y}$ poikkileikkausluokkien 1 tai 2 sauvoille

$W_y = W_{el,y}$ poikkileikkausluokan 3 sauvoille

$W_y = W_{eff,y}$ poikkileikkausluokan 4 sauvoille

χ_{LT} on kiepahduksen huomioonottava pienennyskerroin:

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

missä:

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

α_{LT} on epätäydellisyyssystekijä. Epätäydellisyyssystekijän α_{LT} arvot ruostumattomille teräksille eroavat rakenneterästen vastaavista.

$\alpha_{LT} = 0,34$ kylmämuovatuille profiileille ja rakenneputkille (hitsatut ja saumattomat).

$\alpha_{LT} = 0,76$ hitsatuille avoprofiileille ja muille profiileille, joille ei ole testausaineistoa saatavilla.

Arvo 0,4 kaavassa esittää rajahoikkouden ("plateau length"), jota suuremmilla arvoilla nurjahdus heikentää sauvan kestävyyttä (eroaa rakenneteräksen vastaavasta).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{Cr}}}$$

M_{Cr} kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti (katso liite E suunnittelukäsikirjassa)

Laskentamenetelmä on sama kuin rakenneteräksillä.

Momentin jakautuma palkin sivusuuntaisen siirtymän estävien tukien välillä otetaan huomioon käyttämällä modifioitua arvoa χ_{LT} missä:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}$$

mutta, $\chi_{LT,mod} \leq 1$ ja $\chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$

Suureelle f suositellaan seuraavia minimiarvoja:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] < 1,0$$

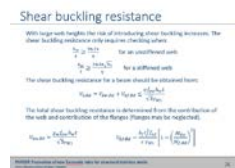
$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$$

Suureelle C_1 arvot on esitetty suunnittelukäsikirjan liitteessä E.

- 72 Uuman korkeuden kasvaessa, riski uuman leikkauslommahdukselle kasvaa. Leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa, kun

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

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24,3\varepsilon\sqrt{k_t}}{\eta} \quad \text{jäykistetyille uumalle}$$



Palkin leikkauslommahduskestävyys lasketaan seuraavasti:

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

Leikkauslommahduskestävyys määritetään ottaen huomioon uuman ja laippojen vaikutus. Yksinkertaistamiseksi laippojen osuus χ_f voidaan jättää huomioon ottamatta. Kuitenkin, jos laipan kestävyys ei ole täysin hyödynnetty taivutusmomentin suhteen ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), laippojen osuus voidaan ottaa huomioon seuraavasti:

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

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

Suureen η arvot, katso NA SFS-EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 suosittelee $\eta = 1,20$.)

Huomaa: samaa arvoa suurelle η käytetään plastisen leikkauskestävyyden ja leikkauslommahduskestävyyden laskemiseksi.

Leikkauslommahdusmitoitus on esitetty käsikirjan luvussa 6.4.3.

Rakenneteräkselle suunnitteluprosessi on samanlainen ruostumattomille teräksille. Kuitenkin eroja raja-arvoissa h_w/t , kun leikkauslommahdus on tarkistettava. Esimerkiksi rakenneterästen mitoitus leikkauslommahduskestävyydelle tehdään, kun

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{72\varepsilon}{\eta} \quad \text{jäykistämättömälle uumalle (rakenneteräs)}$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{31\varepsilon\sqrt{k_t}}{\eta} \quad \text{jäykistetyille uumalle (rakenneteräs)}$$

Taipumat

- 74 Taipumien määrittäminen suoritetaan käyttäen asiaankuuluvaa
75 käyttörajatilaa.
76 Kimmoteorian mukaan mitoitettavien palkkien taipumat (eli ne, joissa ei ole plastisia niveliä), voidaan laskea tavanomaisella rakenteellisella teorialla, paitsi että kimmomodulin sijasta käytetään sekanttimoduulia. Sekanttimoduulin arvo määritetään palkissa vaikuttavien jännitysten perusteella seuraavasti:

$$E_s = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$$

E_{S1} on sekanttimoduulin arvo vastaten vetolaipan jännitystä.
 E_{S2} on sekanttimoduulin arvo vastaten puristuslaipan jännitystä.

Sekanttimoduulin E_s arvo sauvan käyttörajatilan jännityksillä lasketaan (perustuen Ramberg-Osgood malliin):

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

$\sigma_{i,Ed,ser}$ on käyttörajatilan mitoitusjännitys puristetussa tai vedetyssä laipassa

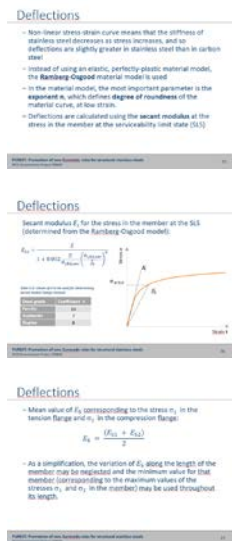
n lasketaan suhteellisuusrajaan sekä myötölujuuteen perustuen ja siten se havainnollistaa jännitys-venymä-kuvaajan epälineaarisuutta, pienempi arvo kuvaa epälineaarisempaa jännitys-venymä-yhteyttä. Suureen n arvot riippuvat ruostumattoman teräksen tyypistä, valmistusmenetelmästä, kylmämuokkauksesta ja kuormituksen suunnasta (puristus/vetojännitys). Suureen n-arvoilla on suuri vaihtelu. Suositeltavat arvot on esitetty taulukossa 6.4.

Taustaa

Ruostumattoman teräksen epälineaarinen jännitys-venymä-yhteys aiheuttaa sen, että kimmomodulin arvo vaihtelee poikkileikkauksessa ja sauvan pituussuunnassa. Tämän vuoksi tarvitaan monimutkaisia, epälineaarisia laskentamenetelmiä ruostumattomasta teräksestä valmistettujen palkkien taipumien tarkkaan määrittämiseen. Yksinkertaistuksena voidaan kimmomodulin arvon vaihtelu palkin pituudella jättää huomioon ottamatta ja käyttää palkin jänneväliillä kimmomodulin pienintä arvoa (vastaten jännityksen maksimiarvoa jänneväliillä). On huomattava, että tämä on tarkka menettely, kun jännitys ei ylitä arvoa 65% 0,2%-rajan arvosta. Suuremmilla jännitystasoilla menetelmä on hyvin paljon varmallalla puolella ja tarkempia menetelmiä tulisi käyttää (sellaisia, joissa kimmomodulin arvoa määritetään tarkemmin jänneväliillä)

EN 1993-1-4

EN 1993-1-4 mukaiset arvot suurelle n ovat riippuvaisia teräslajista ja suunnasta valssaussuuntaan nähden (taulukko 6.5). Huomaa, että duplex terästen arvot perustuivat 2000-luvun alussa vähäiseen tutkimusaineistoon ja silloin määritettyjä n-arvoja pidetään nyt liian alhaisina. Taulukon 6.5 arvot on ehdotettu korvattavaksi seuraavassa EN 1993-1-4 -standardin uudessa versiossa taulukon 6.4 mukaisiksi.

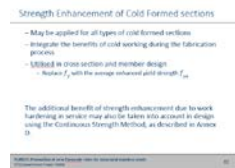


Lujuuden kohoaminen kylmämuovatuissa profiileissa

- 78 Lujuuden kohoamista voi tapahtua kaiken tyyppisissä
79 kylmämuovaamalla valmistetuissa profiileissa. Kylmämuokkauksen
vaikutuksesta korotettu myötölujuus voidaan hyödyntää
80 poikkileikkaukskestävyyden ja sauvan mitoituksessa korvaamalla
myötölujuus f_y keskimääräisellä korotetulla myötölujuudella f_{ya} .

Kylmämuokkauksen aiheuttaman lujuuden kohoaminen voidaan ottaa huomioon mitoituksessa myös jatkuvan lujuuden menetelmää käytettäessä, kuten liitteessä D on kuvattu.

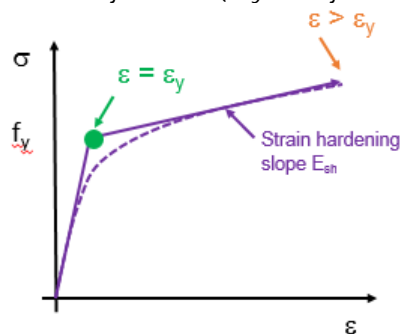
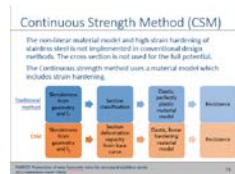
Laskentamenetelmä, ks. Suunnittelukäsikirjan liite B



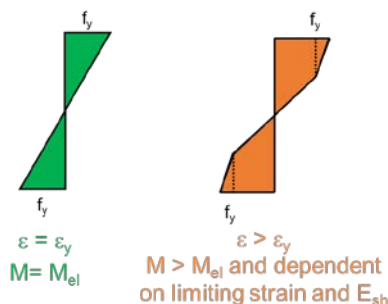
Jatkuvan lujittumisen menetelmä (CSM)

- 82 Kuten aiemmin esitettiin, ruostumattoman teräksen kimmokertoimen
ja myötölujuuden arvot ovat hyvin samat kuin rakenneteräksillä.
83 Mutta jännitys-venymä-yhteys on olennaisesti erilainen:

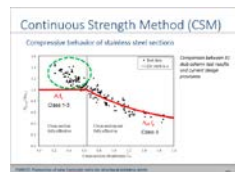
- Rakenneteräksellä on selkeästi havaittava myötöpiste, ja myötäämisalue jota seuraa myötölujittumisalue
- Ruostumattomalla teräksellä on vähitellen alkava myötääminen, jota seuraava voimakkaasti myötölujittuva alue. Kimmoinen, lineaarisesti lujittuva (myötölujittuva



materiaalimalli):



- 84 Kuvaajassa esitetään kirjallisuudesta koottu tutkimusaineistoa
85 ruostumattomien teräsprofiilien poikkileikkauksen
puristuskestävyydelle (stub column-koe). Pystysuoralla akselilla
kokeessa saavutetun vauriokuorman ja poikkileikkauksen
myötökuorman suhde ja vaaka-akselilla poikkileikkauksen levy-osan
hoikkuus.



Punainen kuvaaja esittää nykyistä suunnittelukäyrää, joka perustuu kimmoisen, ideaali plastiseen rakenneteräksen materiaalmalliin.

Mielenkiintoiset havainnot näkyvät käyrän vasemmalla reunalla. Kaikki siellä sijaitsevat koetulokset ovat selvästi myötäämistä vastaavan käyrän osan yläpuolella ja osoittavat siten mitoituskäyrän olevan tältä osaltaan konservatiivinen. Johtopäätös: nykyinen suunnittelukäyrä ovat liian konservatiivinen, erityisesti ruostumattomasta teräksestä valmistetuille kompakteille poikkileikkauksille. Sama havainto on tehty, kun on vertailtu taiputuskestävyyttä.

86 Kimmoinen, lineaarisesti lujittuva materiaalmalli korvaa kimmoisen,
87 ideaali plastisen materiaalmallin.

88 Ensimmäinen vaihe jatkuvan lujittumisen menetelmässä (CSM) on poikkileikkauksen muodonmuutoskyvyn määrittäminen. Toisin sanoen, mikä on venymän arvo, jonka poikkileikkaus voi kokea ennen vaurioitumista levyosan lommahtamalla. Tämä on muodonmuutuskapasiteetin ja paikallisen poikkileikkauksen hoikkisuuden suhde, jota kutsutaan peruskäyräksi.

Tätä raja-arvoa, epsilon CSM, käytetään yhdessä CSM:n toisen olennaisen komponentin kanssa, joka on myötölujittuva materiaalmalli. Myötölujittuvan materiaalmallin plastisen alueen kulmakerroin määräytyy ruostumattoman teräslajin mukaan ... ja eri teräslajeilla lujittumiskäyttäytyminen on erilainen.

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}}$ levymaisille profiileille

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,c}}$ CHS-profiileille

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right)$$

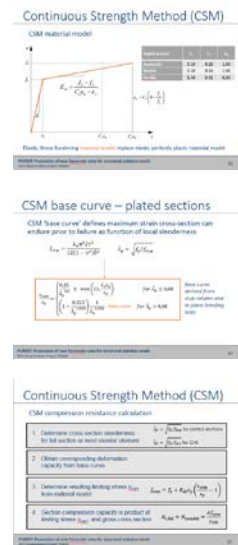
Levymaisille profiileille, kun $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ ja CHS-profiileilla, kun $\bar{\lambda}_c \leq 0,30$, ja $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1,0$, poikkileikkauksen puristuskestävyys lasketaan:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}}$$

Levymaisille profiileille, kun $\bar{\lambda}_p > 0,68$ ja CHS-profiileilla, kun $\bar{\lambda}_c > 0,30$, ja $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1,0$, poikkileikkauksen puristuskestävyys lasketaan:

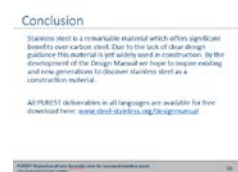
$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm} A f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}}$$

For CSM calculations for resistance in bending, see Design Manual Annex D.



Loppusanat

90 Ruostumaton teräs on monimuotoinen materiaali, joka tarjoaa merkittäviä etuja rakenneteräkseen nähden. Aivan optimaalisimpien mitoitusohjeiden puuttumisesta huolimatta ruostumatonta terästä on jo käytetty laajalti rakentamisessa. Suunnittelukäsikirjassa esitettyjen standardin EN 1993-1-4+A1 mukaisten mitoitusohjeiden sekä



viimeaikaisten tutkimusten tulosten perusteella laadittujen suositusten avulla toivomme innostavamme nykyisiä ja oppilaitoksista työelämään siirtyviä suunnittelijoita valitsemaan ruostumattoman teräksen lisääntyvässä määrin kantaviin rakenteisiin.

Kaikki PUREST-julkaisut ovat saatavilla kaikilla kielillä ilmaiseksi: www.steel-stainless.org/designmanual
