

PUREST – Eurooppalainen projekti

Ruostumattoman teräksen käyttö rakentamisen kohteissa



Kuva 1: Marina Bay Helix Bridge – arkkitehtuuriltaan ja insinööriosaamiseltaan vaikuttava jalankulkusilta Singaporessa. Sillan kaikki kantavat rakenteet ovat poikkileikkaukseltaan pyöreänmuotoista rakenneputkea. Rakenneputket on valmistettu duplex-ruostumattomasta teräksestä. (Kuva Outokumpu Stainless Oy).

Ruostumattomat teräkset ovat hyvin monipuolisia ominaisuuksiltaan. Niillä on hyvä korroosionkestävyys ja kuormankantokyky, niiden erilaisilla pintakäsittelyillä voidaan vaikuttaa rakenteen esteettiseen näyttävyyteen ja ne ovat helppohoitoisia. Ruostumattomia teräksiä käytetään korrosiorasitukseltaan vähäisistä erittäin aggressiivisiin käyttöolosuhteisiin. Ruostumattomista teräksistä voidaan valmistaa tuotteita tavanomaisilla konepajan valmistusmenetelmillä. Näiden ominaisuuksiensa ansiosta ruostumaton teräs on arvostettu ja yhä yleisempi materiaali rakentamisen tuotteissa.

Ruostumattoman teräksen kysyntä kantaviin rakenteisiin on johtanut niille soveltuvien mitoitusstandardien kehittämiseen Euroopassa, Australiassa, Kiinassa ja USA:ssa. Eurooppalainen ruostumattomien terästen mitoitusohje SFS-EN 1993-1-4 (Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-4. Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt.) julkaistiin vuonna 2006. Vuonna 2015 standardiin on julkaistu muutossivu A1. Standardi SFS-EN 1993-1-4+A1(2015) sisältää ruostumattomille teräksille sen ominaispiirteet huomioon ottavien mitoitusyhtälöt ja muilta osiltaan se nojaa standardin SFS-EN 1993 osiin 1-1, 1-2, 1-3, 1-5 ja 1-8.

Kuormaa kantavien rakenteiden mitoitus eroaa ainoastaan hieman vastaavien rakenneteräksestä valmistettujen mitoitukselta. Erot johtuvat pääosin ruostumattomien terästen erilaisista jännitys-venymä-ominaisuuksista. Ruostumattomien terästen jännitys-venymä-kuvaaja on muodol-

taan epälineaarinen, ja myötölujittuminen on voimakasta. Kuviissa 2 ja 3 on esitetty jännitys-venymä-kuvaajien vertailu rakenneteräkseen. Ruostumattomien teräslajien erityispiirteet on huomioitu mitoitusstandardissa SFS-EN 1993-1-4 +A1. Pääsääntöisesti ruostumattomille teräksille käytetään samoja mitoitusyhtälöitä kuin rakenneteräksillekin.

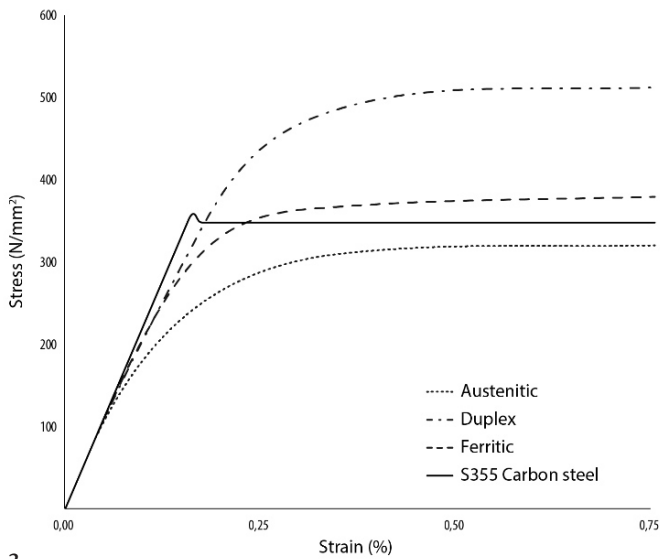
Austeniittiset ruostumattomat teräkset, kuten standardien SFS-EN 10088-4 ja 5 mukaiset teräslajit 1.4301, 1.4307, 1.4401 ja 1.4404 ovat yleisimmin käytettyjä ruostumattomia teräksiä. Niitä käytetään kuormaa kantaviin sovelluksiin, vaikkakin myös uusia duplex-lajeja korkeamman lujuutensa ansiosta käytetään (taulukko 1).

Tyypillisiä käyttösovelluksia austeniittisille ja duplex-ruostumattomille teräslajeille ovat:

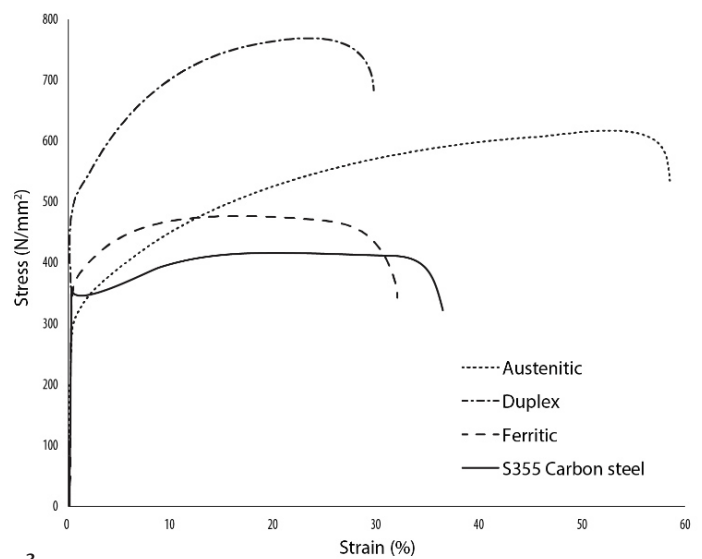
- Palkit, pilarit, hoitotasot ja tuet vedentehdustaloksissa, sellu- ja paperi-, ydinvoima-, biomassaa-, kemia-, lääke- ja ruoka- ja juomateollisuudessa

	EN Numero	Myötölujuus f_y [N/mm ²]
Perus Cr-Ni austeniittinen	1.4301	230
	1.4307	220
Cr-Ni-Mo austeniittinen	1.4401	240
	1.4404	240
Lean Duplex	1.4162	530
Duplex	1.4462	500

Taulukko 1. Yleisimmät rakentamisen kohteissa käytettävät ruostumattomat teräslajit.



2.



3.

- Siltojen primaaripalkit ja -pilarit, nivel-tapit, kaiteet, köysien suojaputket ja liikuntasaumamat
- Rantavallit, laiturit ja muut rannikolle sijoittuvat rakenteet
- Betonirakenteiden raudoiteteräkset
- Rakennusten verhoukset, vesikatot ja sisääntulokatokset
- Siltojen vedenpoistoputket
- Kanavien sulkuportit
- Tunnelien verhoukset
- Verhousien, muurausten ja tunneliverhousien tuentajärjestelmät
- Turva-aidat, kaiteet, käsijohteet, katu-kalusteet
- Puu-, kivi-, kallio- ja muurattujen rakenteiden kiinnikkeet ja ankkurointijärjestelmät
- Uimahallirakennusten rakenteelliset osat ja kiinnikkeet (erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteellisiin kokoonpanoihin, joihin voi uimahallin ilmasta kondensoitua kosteutta ja joka voi aiheuttaa jännityskorroosioriskin
- Räjähdyssä ja törmäystä kestävä rakenteet kuten turvaseinät ja -portit sekä -tolpat
- Palo- ja räjähdysseinät, kaapelihyllyt ja kulkuväylät offshore-porauslautoilla.

PUREST-projektin (Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels) tavoitteena oli koota ja hyödyntää ruostumattoman teräksen viimeaikainen tutkimusaineisto suunnittelijalle soveltuvaan muotoon. Projektin kesto oli 18 kuukautta ja projekti päättyi vuoden 2018 lopussa. Projektin osallistui partnereita seuraavista maista: Saksa, Belgia, Espanja, Portugali, Tšekki, Suomi, Ruotsi, Puola ja Italia. Projektia koordinoi SCI (Steel Construction Institute, Englanti) yhdessä Imperial College London ja Insinööritoimisto ARUP:in kanssa. Suomalainen partneri projektissa oli Teräsrakenneyhdistys ry. Suomalaiset projektin rahoittajat olivat Outokumpu Stainless Oy ja Stalutube Oy.

Projekti oli suunnattu rakennesuunnittelijan tarpeisiin ja se sisälsi seuraavat osiot:

- Käsikirjan – Ruostumattoman teräksen käyttö kantavissa rakenteissa – päivittäminen.

- Käsikirjan kääntäminen englanninkielestä yhdeksälle eurooppalaiselle kielelle.
- Suunnitteluohjelman ja apps:in kehittäminen.
- Kansallisten seminaarien järjestäminen sekä webinaarin luominen etäopiskeluun.
- Oppilaitoksille suunnatun opetuksen soveltuvan kalvosarjan laatiminen

Teräsrakenneyhdistys ry ja muut projektin partnerit ovat julkaisseet neljännen painoksen “Käsikirja – ruostumattoman teräksen käyttö kantavissa rakenteissa”, joka koostuu kolmesta osasta:

- **Suosituks**, jossa esitetään suunnitteluohjeita ja suunnittelijalle olennainen tieto ruostumattomista teräksistä; teräslajin valinta korroosio-olosuhteisiin, säilyvyys, materiaaliominaisuudet, mitoitus-säännöt ja rakenteiden valmistus.
- **Kommenttiosa**, jossa selitetään perusteet Suositus-osassa esitetuille mitoitus-säännöille sekä annetaan taustatietoja ja lähdekirjallisuutta.
- **Mitoitusesimerkit**, joilla havainnollistetaan suositus-osassa esitettyjä mitoitus-sääntöjä.

Kaikki PUREST-projektissa laadittu materiaali on saatavilla sivulla www.steel-stainless.org/designmanual sekä suomenkielistä materiaalia voi tiedustella Teräsrakenneyhdistykseltä info@terasrakenneyhdistys.fi.

Käsikirjassa esitetyt mitoitus-säännöt

PUREST-projektissa on koottu viimeaikaiset ruostumattomien terästen rakenteellista mitoitusta koskeva testausaineisto ja niiden perusteella käsikirjassa esitetään suosituksina tarkemmin ruostumattomille teräksille uusia tai modifioituja mitoitusyhtälöitä. Nämä muutokset otetaan huomioon myös käynnissä olevassa standardin EN 1993-1-4 revisiossa.

Käsikirjassa esitetyt mitoitus-säännöt ovat yhdenmukaiset standardin EN 1993-1-4 ja sen vuonna 2015 julkaistun muutoksen A1 kanssa. PUREST-projektissa laaditut muutosehdotukset näkyvät selkeästi erottuvina

Kuva 2: Jännitys-venymä-kuvaajat venymä-alueella 0 – 0,75 % ruostumattomille teräksille ja rakenneteräksille

Kuva 3: Ruostumattomien terästen ja rakenneteräksen jännitys-venymä-kuvaajat murtoon asti.

voimassa olevan SFS-EN 1993-1-4+A1 mukaisista menettelyistä.

Vaikkakin ruostumattomilla teräksillä on lähes samanlaiset ominaisuudet kuin rakenneteräksillä, ruostumattoman teräksen epälineaarinen jännitys-venymä-käyrä tarkoittaa, että ruostumattoman teräksen mitoitusyhtälöissä on eroja rakenneterästen vastaaviin. Erityisesti epälineaarinen käyttäytyminen vaikuttaa paikalliseen ja globaalin nurjahduskäyttäytymiseen.

Osa standardissa EN 1993-1-4:2006 esitetyistä mitoitusyhtälöistä ovat hyvin konservatiivisia johtuen silloin käytössä olleiden tutkimusaineiston vähäisestä määrästä. Standardin julkaisun jälkeen ruostumattoman teräksen tutkimus on ollut aktiivista ja tutkimusaineistoa kantaviin rakenteisiin on luotu eurooppalaisissa ja myös Euroopan ulkopuolisten maiden projekteissa. Tällä hetkellä tutkimusaineisto on kolminkertainen siihen nähden kuin oli käytettävissä vuoden 2006 julkaisuun. Uusien tutkimustulosten ansiosta standardia EN 1993-1-4 muutettiin osittain vuonna 2015 (julkaistiin amendment A1). Uudet mitoitusohjeet mahdollistavat taloudellisemmän mitoituksen sekä usean uuden ruostumattoman teräslajin käytön kantavissa rakenteissa.

Standardin EN 1993-1-4+A1 merkittävimmät muutokset ovat olleet poikkileikkausluokituksen raja-arvojen muuttuminen lähes vastaaviksi kuin rakenneteräksillä, leikkauslommahduskestävyyden mitoituksen tarkistaminen ja on esitetty tarkempi mitoitusyhtälö sekä on lisätty kylmämuokatun materiaalin mitoitusohjeet.

Käsikirjaan on lisätty mitoitus-säännöt ferriittisille ruostumattomille teräksille. Ferriittisiä ruostumattomia teräslajeja on yleisesti saatavilla ainespaksuuteen 4 mm asti, ja ne tarjoavatkin korroosiota kestävä vaihtoehdon monille sovelluksille, joissa käytetään ohutseinämäisiä sinkittyjä teräksiä.

Käsikirjaan on sisällytetty myös kaksi uutta mitoitusmenetelmää. Ensimmäinen niistä esittää, miten otetaan huomioon valmistuksen aikaisessa kylmämuovausprosessissa muokkauslujuuttumisen aiheuttaman lujuuden nousu (lujuuden kohoaminen voi olla 50 % rakenneputkien kylmämuokatuissa nurkissa ja joissain tapauksissa myös profiilin taso-osillakin). Toinen uusi mitoitusmenetelmä on poikkileikkauksen myötölujittumisen vaikutuksesta kohonneen kestävyyslaskenta ”jatkuvan lujuuttumisen menetelmällä (CSM)”.

Korroosionkestävyys

Ruostumattomien teräslajien korroosionkestävyys perustuu teräksen pinnalle erittäin tiukasti kiinnittyvään ja itsestään hapen vaikutuksesta muodostuvaan suojaavaan kromioksidikalvoon, jota kutsutaan myös passiivikalvoksi. Tästä syystä ruostumaton teräs ei tarvitse erillistä korroosiosuojäkäsittelyä. Seosaineiden määrä vaikuttaa passiivikalvon muodostumiseen ja sen käyttäytymiseen tietyssä korroosio-olosuhteessa. Koska ruostumattomia teräslajeja on suuri määrä ja koska tietty teräslaji on määritelty seosaineiden ja niiden määrän perusteella, voidaan tiettyyn korroosiorasitukseen aina valita optimaalinen teräslaji. Mikäli käyttöympäristön olosuhde ei muutu suunnitellun käyttöajan aikana, passiivikalvon ansiosta ruostumaton teräs säilyttää ominaisuutensa eikä sen korroosionkestävyys muutu. Tämä mahdollistaa rakenteen ylläpidon vain vähäisellä määrin huoltotoimia. Rakenteissa, joiden tarkastaminen ja huoltotoimien suorittaminen asennuksen jälkeen on hankalaa tai joiden korroosio-pinnoitteita voi olla tarve huoltaa useasti käytön aikana korroosioriskin vuoksi, käyttämällä ruostumattomia teräksiä voidaan vähentää käytönaikaista kunnossapitoa, seisokkiaikoja sekä rakenneosien vaihtamista. Tämä voi olla kustannustehokas ratkaisu vaikkakin materiaalikustannus alkuinvestoinnissa olisi korkeampi.

Ruostumattoman teräksen valinta korroosio-olosuhteisiin

Ruostumattoman teräksen valitsemiseksi ilmastokorroosio-olosuhteisiin on standardissa EN 1993-1-4+A1 esitetty uusi menettely teräslajin valitsemiseksi. Menettely koostuu seuraavista vaiheista:

- Tietyn ympäristön korroosionkestävyystekijän (CRF, corrosion resistance factor) määrittäminen
- Korroosionkestävyysluokan (CRC, corrosion resistance class) määrittäminen CRF:n perusteella.
- CRF on riippuvainen ympäristörasituksesta ja se lasketaan seuraavasti:

- $F_1 + F_2 + F_3$ missä
- F_1 = Riski altistua merivedestä tai jäänpoistosuoloista peräisin oleville klorideille
- F_2 = Riski altistua rikkidioksidille
- F_3 = Puhdistusväli tai altistuminen sateen puhdistusvaikutukselle.



Korroosionkestävyystekijä CRF ottaa huomioon kaikki korroosimuodot mm. piste- ja rakokorroosion sekä jännityskorroosion, jotka voivat vaikuttaa kuormaa kantavien osien eheyteen. Teräslajin valintamenettelyn lähtökohdaksi on, että sen mukaisesti valittu teräslaji ei altistu korroosiolle siinä määrin, että se vaikuttaisi rakenneosan eheyteen. Kuitenkin joissain tapauksissa voi tapahtua teräksen pinnan vierasuosteiden syntymistä tai vähäistä pistekorroosiota, joka voi olla kosmeettinen epäkohta, mutta tämä ei ole rakenteellisen kestävyyskannalta haitallista.

Kuva 4: Ruostumattomasta duplex-teräksestä LDX 2101 valmistettuja rakenneputkia ja levyjä Tampereen Energiantuotanto Oy:n Palatsinraitin sillan ja padon rakenteissa. Ruostumattomat rakenneputket on valmistettu Lean Duplex -teräksestä, niiden koko on 300x300x8 mm ja pituus 6,5 m. Rakenneputkien viimeistely on tehty putkilaserilla rei'ittämällä ne suunnitelmien mukaisiksi. (Kuva Stalatable Oy).

Kuva 5: Rakenteellisia ruostumattomia profiileja Puolassa sijaitsevan teollisuuslaitoksen kattorakenteessa. (Kuva Montanstahl).

Kuva 6: Tukholmassa sijaitsevan rautatiesillan kantavan palkin valmistus (vasen) ja asennus (oikea). (Kuva. Lars Hamrebjörk).

Ruostumattomat teräslajit luokitellaan viiteen korroosionkestävyyoluokkaan (CRC), joista luokka 5 sisältää parhaiten korroosiota kestävät ruostumattomat teräslajit (esimerkiksi erittäin syövyttäviin uimahalliympäristöihin). Teräslajin lopullinen valinta voidaan tehdä korroosionkestävyyoluokan sisältämistä teräslajeista esimerkiksi edellyttämällä teräslajille tietty lujuus tai saatavuus markkinoilta. Suunnittelija voi määrittellä materiaalin vaatimukset esimerkiksi korroosionkestävyyoluokka II ja myötölujuus $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$, joiden perusteella teräslaji voidaan hankkia.

Käyttökohteita

Singaporessa on rakennettu Marina Bay Helix Bridge – jalankulkusilta yhdistämään kaupungin uusia liike- ja rahoituskeskusalueita, korkeatasoisia asuinalueita ja merenrannan puutarha-alueita (kuva 1). Sillan kantavan rungon muodostavat kaksi sisäkkäistä spiraalin muotoon taivutettua rakenneosaa, jotka on valmistettu ruostumattomista duplex-CHS-rakenneputkista. Silta sijaitsee kuumassa ja kosteassa Singaporen merellisessä ympäristössä, joka altistaa materiaalin vaativalle korroosiorasitukselle. Rakenteen suunniteltu käyttöikä tässä ympäristössä on 100 vuotta ja edellytyksenä vähäiset huolto- ja kunnossapitotoimet käyttöiän aikana. Duplex ruostumattoman teräksen käyttöön on päädytty sen korkean lujouden, valmistettävyyden sekä hyvän korroosionkestävyyden ansioista. Arkkitehtuuriltaan ja insinööriosaiseltaan tämä vaativa rakenne luo uutta suuntaa ruostumattoman teräksen käytölle esteettisissä kuormaa kantavissa rakenteissa.

Tampereen keskustassa, kulttuurihistoriallisesti merkittävässä ympäristössä ruostumatonta terästä on käytetty Tammerkosken yli kulkevan Palatsinraitin sillan ja padon uudelleenrakentamisessa (kuva 4). Rakenteet on suunniteltu 200 vuoden käyttöiälle. Lean Duplex-ruostumattomat levyt ja rakenneputket valittiin patoporttien, välppien ja settipatojen materiaaliksi pitkän käyttöiän, huoltovapauden ja lujouden vuoksi. Ruostumatonta terästä kohteessa on käytetty lähes 200 tn. Ruostumattomat rakenneputket, joita kantavissa rakenteissa käytettiin, olivat dimensioltaan 300x300x8 mm ja määrämittäisiä pituudeltaan 6,5 m.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty ruostumattoman teräksen käyttöä kantavissa rakenteissa. Kuvassa 5 on Puolassa sijaitsevan kemian-teollisuuden laitoksen kupolikaton kantavat rakenteet, jotka on valmistettu austeniittisestä ruostumattomasta teräslajista 1.44.04. Katon kantavat rakenteet ovat hitsattuja IPE270 profiileja (144 palkkia), joiden jänneväli on 15 m sekä kuumavalssattuja U- ja L-profiileja. Rakennuksen runkoon käytettyjen ruostumattomien terästen määrä on 95 tn.

Kuvassa 6 on siltapalkkien valmistusta ja asennusta Tukholmassa sijaitsevaan siltaan. Siltapalkit, joiden korkeus on 1 m valmistetaan duplex-ruostumattomasta teräslajista 1.44.62. Ruostumaton palkki korvaa aiemmin rautatiesiltan asennetun rakenneteräksistä

KÄSIKIRJA - RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN KÄYTTÖ KANTAVISSA RAKENTEISSA

NELJÄS PAINOS



7.

Kuva 7: PUREST-projektissa päivitetty ja julkaistiin ”Käsikirja-ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa” 4. painos.

Käsikirjaa voi tilata osoitteesta info@teras-rakenneyhdistys.fi

valmistetun palkin. Tilaaja, Stockholm Public Transport, valitsi ruostumattoman teräksen sen vähäisen huoltotarpeen perusteella.

Tunnelit ovat yleensä vaativia ympäristöjä rakentamis- ja huoltotoimenpiteiden osalta, joista syistä ruostumattoman teräksen valinta, vaikkakin on kalliimpi materiaali, voi olla hyväksyttävää, kun tunnelin rakenteita arvioidaan kokonaisuutena elinkaarikustannuksen näkökulmasta. Austeniittinen ruostumaton teräslaji 1.44.04 on ollut käytössä viiden Etelä-Walesissa sijaitsevan rautatietunnelin rakenteissa, joiden suunniteltu käyttöikä on 80 vuotta. Vastaavasti 7 km pitkän Severn tunnelin rakenteissa on käytetty runsaasti seostettuja ruostumattomia teräksiä (super-austeniittinen 1.4529 ja super-duplex 1.4410), koska tunnelissa vaikuttaa Severnin suistoalueen kloridipitoinen ilmasto.

Lähteet

- (1) SFS-EN 1993-1-4:2006+A1:2015 Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt
Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa, Teräsrakenneyhdistys ry, 2017
- (2) SFS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014 Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- (3) SFS-EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt. Lisäsääntöjä kylmämuovaamalla valmistetuille sauvoille ja levyille
- (4) SFS-EN 1993-1-5:2006 Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Levyrakenteet
- (5) SFS-EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Liitosten suunnittelu
- (7) SFS-EN 10088-4. Ruostumattomat teräkset. Osa 4: Rakennuskäyttöön tarkoitettujen korroosionkestävien levyjen ja nauhojen tekniset toimitusehdot.
- (8) SFS-EN 10088-5. Ruostumattomat teräkset. Osa 5: Rakennuskäyttöön tarkoitettujen korroosionkestävien tangon, valsilangan, langan, profiilit ja kirkkaat tuotteet. Tekniset toimitusehdot.

Pekka Yrjölä, Erityisasiantuntija/DI
Teräsrakenneyhdistys ry