

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

TERÄSTEN STANDARDINMUKAISET SEOSAINEPITOISUUDET JA NIIDEN  
VAIHTELUIDEN VAIKUTUS HITSATTAVUUTEEN

CHEMICAL COMPOSITION OF STEELS BASED ON STANDARDS AND THEIR  
EFFECT ON WELDABILITY

Eliel Kouvalainen 24.04.2012

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	5
1.2 Kandidaatintyön tavoitteet ja rajaus .....	5
2 SEOSTAMATTOMAT JA NIUKKASEOSTEISET TERÄKSET .....	6
2.1 Hitsattavuuden arviointi .....	7
2.1 Yleiset rakenneteräksset .....	9
2.1.1 Kylmähalkeilualttius yleisille rakenneteräksille .....	9
2.1.2 Kuumahalkeilualttius yleisille rakenneteräksille .....	10
2.1.3 Myöstöhalkeilualttius yleisille rakenneteräksille .....	11
2.1.4 Lamellirepeilyalttius yleisille rakenneteräksille .....	11
2.2 Paineastiatäräksset .....	11
2.2.1 Kylmähalkeilualttius paineastiatäräksille .....	12
2.2.2 Kuumahalkeilualttius paineastiatäräksille .....	13
2.2.3 Myöstöhalkeilualttius paineastiatäräksille .....	13
2.2.4 Lamellirepeilyalttius paineastiatäräksille .....	14
2.3 Laivanrakennusteräksset .....	14
2.3.1 Kylmähalkeilualttius laivanrakennusteräksille .....	15
2.3.2 Kuumahalkeilualttius laivanrakennusteräksille .....	15
2.3.3 Myöstöhalkeilualttius laivanrakennusteräksille .....	16
2.3.4 Lamellirepeilyalttius laivanrakennusteräksille .....	17
2.4 Säänkestävät teräksset .....	17
2.4.1 Kylmähalkeilualttius säänkestäville teräksille .....	18
2.4.2 Kuumahalkeilualttius säänkestäville teräksille .....	18
2.4.3 Myöstöhalkeilualttius säänkestäville teräksille .....	19
2.4.4 Lamellirepeilyalttius paineastiatäräksille .....	19
2.5 Lujat teräksset .....	19
2.5.1 Kylmähalkeilualttius lujille teräksille .....	20
2.5.2 Kuumahalkeilualttius lujille teräksille .....	20
2.5.3 Myöstöhalkeilualttius lujille teräksille .....	21

2.5.4 Lamellirepeilyalttius lujille teräksille .....	21
3 RUOSTUMATTOMAT JA HAPONKESTÄVÄT TERÄKSET .....	22
3.1 Austeniittiset ruostumattomat teräkset .....	25
3.1.1 Nikkeli- ja kromiekvivalentit austeniittisille ruostumattomille teräksille .....	26
3.2 Austeniittiset haponkestävät teräkset .....	27
3.2.1 Nikkeli- ja kromiekvivalentit austeniittisille haponkestäville teräksille .....	27
4 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI .....	29
4.1 Kylmähalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille .....	29
4.2 Kuumahalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille .....	30
4.3 Myöstöhalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille .....	31
4.4 Lamellirepeilytulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille .....	32
4.5 Austeniittisten ruostumattomien terästen tulokset .....	33
4.5 Austeniittisten haponkestävien terästen tulokset .....	33
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35
6. YHTEENVETO .....	36
LÄHTEET .....	37

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Al	Alumiini
B	Boori
C	Hiili
CEV	Hiiliekvivalentti
Cr	Kromi
Cr-ekv	Kromiekvivalentti
CS	Myöstöhalkeilualttius
Cu	Kupari
Mn	Mangaani
Mo	Molybdeeni
MPa	$\frac{N}{mm^2}$
N	Typpi
Nb	Niobium
Ni	Nikkeli
Ni-ekv	Nikkeliekvivalentti
P	Fosfori
S	Rikki
Si	Pii
Ti	Titaani
UCS	Jähmettymishalkeaman herkkyyssindeksi
V	Vanadiini
Zr	Zirkonium

## 1 JOHDANTO

Globalisoitumisen ansiosta kuluttajalla on yhä enemmän vaihtoehtoja terästoimittajansa valinnassa. Sama teräs on mahdollista tilata Kaukoidästä tai esimerkiksi Saksasta. Vaikka kyseinen teräs olisi molemmissa tapauksissa valmistettu voimassa olevien standardien mukaisesti, saattaa seosainepitoisuudessa kuitenkin olla merkittäviä eroja. Terästä hitsattaessa nämä erot realisoituvat. On mahdollista pilata koko erä, ellei seostuksesta olla perillä ennen hitsauksen aloittamista. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää, miten seostuksen muuttaminen standardien suomissa rajoissa vaikuttaa eri teräslaatujen hitsattavuuteen.

### 1.2 Kandidaatintyön tavoitteet ja rajaus

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen sekä ruostumattomien ja haponkestävien terästen hitsattavuutta eri seostuspitoisuuksilla. Seostamattomista ja niukkaseosteisista teräksistä rajaudutaan yleisiin rakenneteräksiin, paineastiateräksiin, laivanrakennusteräksiin ja säänkestäviin teräksiin. Ruostumattomista teräksistä tarkastellaan ainoastaan austeniittisia ruostumattomia teräksiä ja austeniittisia haponkestäviä teräksiä. Hitsattavuutta arvioidaan seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille selvittämällä edellä mainittujen teräksien taipumukset kylmä- ja kuumahalkeiluun, lamellirepeilyyn ja myöstöhalkeiluun seosaineiden ollessa maksimissaan, minimissään ja näiden kahden puolivälissä. Ruostumattomien ja haponkestävien teräksien hitsattavuutta arvioidaan selvittämällä nikkeli- ja kromiekvivalentit ja hyödyntämällä saatuja arvoja Bystramin diagrammin avulla.

## 2 SEOSTAMATTOMAT JA NIUKKASEOSTEISET TERÄKSET

Jotta terästä voidaan nimittää seostamattomaksi teräkseksi, on sen täytettävä tietyt ehdot. Taulukossa 1 on esitelty eri seosaineiden ylärajat seostamattomille teräksille. Terästä, joka täyttää taulukon 1 ehdot, nimitetään hiiliteräkseksi riippumatta siitä, mikä kyseisen teräksen hiilipitoisuus on. (Koivisto et al., 2001, s.129.)

*Taulukko 1. Seostamattoman teräksen seosaineiden ylärajat (SFS-EN 10020).*

Seosaine	Raja-arvo painoprosentteina
Alumiini	0,30
Boori	0,0008
Vismutti	0,10
Koboltti	0,30
Kromi	0,30
Kupari	0,40
Lantanidit (jokainen)	0,10
Mangaani	1,65
Molybdeeni	0,08
Niobi	0,06
Nikkeli	0,30
Lyijy	0,40
Seleeni	0,10
Pii	0,60
Telluuri	0,10
Titaani	0,05
Vanadiini	0,10
Volframi	0,30
Zirkoni	0,05
Muut (paitsi hiili, fosfori, rikki, typpi) (jokaisen yläraja)	0,10

## 2.1 Hitsattavuuden arviointi

Seostamattomien teräksien kylmähalkeilualttiutta arvioidaan hiiliekvivalentin avulla. Hiiliekvivalentti eli CEV voidaan laskea yhtälöllä 1. (Valorinta,1983, s.140.)

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

CEV≤0,41 tarkoittaa hyvää hitsattavuutta kaikilla menetelmillä kylmähalkeiluriskiinähdän, 0,41≤CEV≤0,45 tarkoittaa hyvää hitsattavuutta, kun käytetään kuivia emäspäälysteisiä niukkavetyisiä puikkoja. CEV:n ollessa yli 0,45 on suoritettava esikuumennus jäähtymisnopeuden pienentämiseksi. Hiiliekvivalentin kaavaa suositellaan etenkin hiili-, hiilimangaani ja mikroseostetuille hienoraeteräksille, teräksen hiilipitoisuuden ollessa yli 0,18%. (Valorinta,1983, s.140; Rautaruukki, 1997, s. 35.)

Kuumahalkeama esiintyy hitsin pitkittäissuunnassa ja ne esiintyvät yleisesti pohjapaloissa. Kuumahalkeama liittyy hitsin epäpuhtauksiin, joista tärkeimpiä ovat rikki ja fosfori, ja se voi heikentää ratkaisevasti hitsin kestävyyttä. Kuumahalkeilualttiutta arvioidaan jähmettymishalkeilun herkkyysindeksin UCS:n avulla. Kaavaa voidaan käyttää, mikäli teräksen seosainepitoisuudet täyttävät standardissa mainitut ehdot. Ehdot esitetään taulukossa 2. UCS kuvaa hitsiaineen vastustuskykyä halkeilua vastaan. Jähmettymishalkeilun herkkyysindeksi UCS voidaan laskea yhtälöllä 2. (SFS-EN 1011-2)

$$UCS = 230 \times C + 190 \times S + 75 \times P + 45 \times Nb - 12,3 \times Si - 6,5 \times Mn - 1 \quad (2)$$

Taulukko 2. Seosaineiden ehdot kaavan 2 käytölle (SFS-EN 1011-2).

Seosaine	Pitoisuusprosentti
C	0,03*...0,23
S	0,01...0,05
P	0,01...0,045
Si	0,15...0,65
Mn	0,45...1,6
Nb	0...0,07
* Pitoisuuden ollessa alle 0,08, käytetään arvoa 0,08	

Kun  $UCS < 10$ , on hitsiaineen vastustuskyky halkeilua vastaan suuri. Vastustuskyky halkeilua vastaan on pieni, kun  $UCS > 30$ . Kun UCS saa arvon väliltä 10...30, on halkeamistaipumus suurempi paloissa, joiden syvyys/leveys-suhde on suuri, jotka on hitsattu käyttäen suuria nopeuksia tai joiden railojen sovitustarkkuus lähestyy sallittuja ylärajoja. (SFS-EN 1011-2)

Mikäli myöstöhehkutus on suoritettu väärin tai teräksen kemiallinen koostumus ei ole oikea, saattaa mikrorakenteessa esiintyä karbidien ja nitridien erkautumista. Tämän seurauksena teräksen sitkeys saattaa heikentyä ja teräksen sisäiset jännitykset saattavat laukaista halkeamia. Näin syntyneitä halkeamia kutsutaan myöstöhalkeamiksi. (SFS-EN 1011-2) Yhtälöllä 3. arvioidaan myöstöhalkeilua. Taipumus myöstöhalkeiluun on pieni, kun  $CS < 0$ . (Martikainen, 2011, s.37)

$$CS = Cr + 3,3 \times Mo + 8,1 \times V - 2 \quad (3)$$

Lamellirepeilyä esiintyy hitsausliitoksissa, joissa esiintyy kutistumisjännityksiä levyn paksuussuunnassa. Lamellirepeilyä aiheuttaa jaksottaiset tai iskumaiset kuormitukset. (SFS-EN 1011-2) Lamellirepeämät muodostuvat hitsausliitoksen pinnan suuntaisesti. Lamellirepeilyä esiintyy eniten jäykissä piena- ja päittäishitsatuissa L- ja T-liitoksissa, koska niissä paksuussuuntaiset jännitykset voivat olla suuria. (Rautaruukki, 1997, s. 42) Teräksen rikkipitoisuus on määräävä tekijä lamellirepeilyn muodostumisessa. Mitä vähemmän rikkiä teräs sisältää, sitä pienempi riski lamellirepeilyyn on. Lamellirepeilyn riski pienenee rajusti rikkipitoisuuden ollessa alle 0,007%. (Lancaster, 1980, s.155-156) Todellisuudessa tämä arvo saa olla kuitenkin reilusti suurempi.



## 2.1 Yleiset rakenneteräkset

Yleisten rakenneterästen tavanomaisia käyttökohteita ovat rakennusten ja koneiden rungot, sillat ja erilaiset säiliöt. Yleisiä rakenneteräksiä voidaan käyttää hitsattuihin tai hitsaamattomiin rakenteisiin. Standardin SFS-EN 10025 perusteella yleiset rakenneteräkset toimitetaan kuumamuovattuina. Yleisten rakenneterästen maksimimurtolujuudet ovat noin 500 MPa. (Valmet Oy, 1984, s.11; Airila et al.,1995,s. 111-112.)

Standardissa SFS-EN 10025-2 esitellään yleisten rakenneterästen kemiallinen koostumus. Taulukossa 3 on esitelty standardiin SFS-EN 10025-2 perustuen seosaineiden maksimipitoisuudet, minimipitoisuudet sekä keskiarvopitoisuudet.

*Taulukko 3. Yleisten rakenneterästen seosaineiden pitoisuudet (SFS-EN 10025-2).*

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,24	0,17	0,205
Si	0,55	0	0,275
Mn	1,7	1,4	1,55
P	0,035	0,025	0,03
S	0,035	0,025	0,03
N	0,025	0	0,0125
Cu	0,55	0,55	0,55
Nb	0,05	0	0,025
V	0,13	0	0,065
Ti	0,05	0	0,025

### 2.1.1 Kylmähalkeilualttius yleisille rakenneteräksille

Kylmähalkeilua arvioitiin kohdassa 2.1 kaavan 1. mukaisesti. Seuraavaksi arvioidaan kylmähalkeilua, kun arvot ovat maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$CEV_{\max}=0,24 + \frac{1,7}{6} + \frac{0,13}{5} + \frac{0,55}{15}$$

$$CEV_{\max}=0,59$$

$$CEV_{\min}=0,17 + \frac{1,4}{6} + \frac{0,55}{15}$$

$$CEV_{\min}=0,44$$

$$CEV_{ka}=0,205 + \frac{1,55}{6} + \frac{0,065}{5} + \frac{0,55}{15}$$

$$CEV_{ka}=0,51$$

### 2.1.2 Kuumahalkeilualttius yleisille rakenneteräksille

Kuumahalkeilualttiutta arvioitiin kohdassa 2.1 kaavalla 2. Seuraavaksi lasketaan kuumahalkeilualttiudet seosainepitoisuuksien ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$UCS_{max}=230 \times 0,24 + 190 \times 0,035 + 75 \times 0,035 + 45 \times 0,05 - 12,3 \times 0,55 - 6,5 \times 1,7 - 1$$

$$UCS_{max}=47,91$$

$$UCS_{\min}=230 \times 0,17 + 190 \times 0,025 + 75 \times 0,025 + 45 \times 0 - 12,3 \times 0 - 6,5 \times 1,4 - 1$$

$$UCS_{\min}=35,63$$

$$UCS_{ka}=230 \times 0,205 + 190 \times 0,03 + 75 \times 0,03 + 45 \times 0,025 - 12,3 \times 0,275 - 6,5 \times 1,55 - 1$$

$$UCS_{ka}=41,77$$

### 2.1.3 Myöstöhalkeilualttius yleisille rakenneteräksille

Myöstöhalkeilualttiutta arvioitiin kohdassa 2.1 kaavalla 3. Seuraavaksi lasketaan myöstöhalkeilualttiudet seosainepitoisuuksien ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$CS_{\max} = 0 + 3,3 \times 0 + 8,1 \times 0,13 - 2$$

$$CS_{\max} = -0,95$$

$$CS_{\min} = 0 + 3,3 \times 0 + 8,1 \times 0 - 2$$

$$CS_{\min} = -2$$

$$CS_{ka} = 0 + 3,3 \times 0 + 8,1 \times 0,065 - 2$$

$$CS_{ka} = -1,47$$

### 2.1.4 Lamellirepeilyalttius yleisille rakenneteräksille

Lamellirepeilyä voidaan arvioida rikkipitoisuuden perusteella. Kaikissa seostuspitoisuuksissa rikkipitoisuus on selvästi yli arvon 0,007%, joten riski lamellirepeilylle on olemassa.

## 2.2 Paineastiateräokset

Paineastiateräksiä käytetään nimensä mukaisesti paineenalaisissa rakenteissa. Paineastiateräksien käyttölämpötila on usein korkea, joten näiltä teräksiltä vaaditaan kuumalujuutta. Korkeiden laatuvaatimuksien johdosta paineastiateräksien tarkastus sekä aineenkoetus on merkittävästi tarkempaa kuin esimerkiksi yleisillä rakenneteräksillä. Teräksen on oltava valmistusvaiheessa kylmämuovattavissa esimerkiksi taivutusta varten, sekä myöhemmin hitsauksessa ja käytössä sen on kestävä haurasmurtumaa vastaan. (Valorinta, 1983, s.145; Koivisto et al., 2001, s.137.)

Paineastiateräksien kemiallinen koostumus esitetään standardissa SFS-EN 10028-2. Taulukossa 4 esitellään standardin mukaisesti seosaineiden maksimiarvot, minimiarvot sekä keskiarvot.

*Taulukko 4. Paineastiateräksien seosainepitoisuudet (SFS-EN 10028-2).*

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,22	0,08	0,15
Si	0,60	0,35	0,475
Mn	1,70	0,40	1,05
P	0,25	0,25	0,25
S	0,01	0,01	0,01
Al	0,02	0,02	0,02
N	0,012	0,012	0,012
Cr	0,30	0,30	0,30
Cu	0,30	0,30	0,30
Mo	0,35	0,08	0,215
Nb	0,04	0	0,02
Ni	0,30	0,30	0,30
Ti	0,03	0	0,015
V	0,02	0	0,01

### 2.2.1 Kylmähalkeilualttius paineastiateräksille

Kylmähalkeilua arvioidaan hiiliäkivalentin, kaava 1, mukaan, joka on esitetty kohdassa 2.1. Arviointi suoritetaan samoin kuin kappaleessa 2.1.1 yleisille rakenneteräksille.

$$CEV_{\max} = 0,22 + \frac{1,7}{6} + \frac{0,3+0,35+0,02}{5} + \frac{0,3+0,3}{15}$$

$$CEV_{\max} = 0,68$$

$$CEV_{\min} = 0,08 + \frac{0,4}{6} + \frac{0,3+0,08+0}{5} + \frac{0,3+0,3}{15}$$

$$CEV_{\min} = 0,41$$

$$CEV_{ka} = 0,15 + \frac{1,05}{6} + \frac{0,3+0,215+0,01}{5} + \frac{0,3+0,3}{15}$$

$$CEV_{ka}=0,47$$

### 2.2.2 Kuumahalkeilualttius paineastiateräksille

Paineastiaterästen kuumahalkeilualttiutta arvioidaan samoin kuin yleisiä rakenneteräksiä. Kuumahalkeilua kuvaava kaava 2 on esitetty kohdassa 2.1.

$$UCS_{max}=230 \times 0,22 + 190 \times 0,01 + 75 \times 0,25 + 45 \times 0,04 - 12,3 \times 0,6 - 6,5 \times 1,7 - 1$$

$$UCS_{max}=53,62$$

$$UCS_{min}=230 \times 0,08 + 190 \times 0,01 + 75 \times 0,25 + 45 \times 0 - 12,3 \times 0,35 - 6,5 \times 0,4 - 1$$

$$UCS_{min}=31,12$$

$$UCS_{ka}=230 \times 0,15 + 190 \times 0,01 + 75 \times 0,25 + 45 \times 0,02 - 12,3 \times 0,475 - 6,5 \times 1,05 - 1$$

$$UCS_{ka}=42,38$$

### 2.2.3 Myöstöhalkeilualttius paineastiateräksille

Myöstöhalkeilualttiutta arvioitiin kohdassa 2.1 kaavalla 3. Seuraavaksi arvioidaan myöstöhalkeilualttiutta seostuksen ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$CS_{max}=0,3 + 3,3 \times 0,35 + 8,1 \times 0,02 - 2$$

$$CS_{max}=-1,49$$

$$CS_{min}=0,3 + 3,3 \times 0,08 + 8,1 \times 0 - 2$$

$$CS_{min}=-1,92$$

$$CS_{ka}=0,3 + 3,3 \times 0,215 + 8,1 \times 0,01 - 2$$

$$CS_{ka}=-0,91$$

#### 2.2.4 Lamellirepeilyalttius paineastiateräksille

Rikki­pitoisuus pysyy seostuksesta riippumatta arvossa 0,01%. Rikki­pitoisuuden ollessa näin pieni on lamellirepeilyriski selvästi pienempi kuin esimerkiksi yleisillä rakenneteräksillä.

#### 2.3 Laivanrakennusteräokset

Laivanrakennusteräosten valmistusta ja käyttöä valvovat useat laivaluokitusseurat eri puolilta maailmaa. Suomessa esimerkiksi Rautaruukki valmistaa laivanrakennusteräoksiä laivaluokitusseurojen sääntöjen mukaisesti. Rautaruukin valmistamien laivanrakennusteräosten myötölujuudet vaihtelevat välillä 235...500 MPa. (Rautaruukki, 1997, s. 14)

Laivanrakennusteräosten kemiallinen koostumus esitellään standardissa SFS-EN 10225. Taulukossa 5 esitellään standardin perusteella saadut maksimipitoisuudet, minimipitoisuudet sekä keskiarvo.

Taulukko 5. Laivanrakennusterästen seosainepitoisuudet (SFS-EN 10225).

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,20	0,14	0,17
Si	0,50	0,50	0,50
Mn	1,65	0,90	1,275
P	0,035	0,030	0,0325
S	0,030	0,025	0,0275
Cr	0,3	0	0,15
Mo	0,20	0,10	0,15
Ni	0,50	0,30	0,40
Al	0,02	0,02	0,02
Cu	0,35	0	0,175
N	0,015	0,015	0,015
Nb	0,06	0,05	0,055
Ti	0,05	0,03	0,04
V	0,12	0,10	0,11

### 2.3.1 Kylmähalkeilualttius laivanrakennusteräksille

Lasketaan kaavan 1 mukaan hiilikvivalentit laivanrakennusteräksille. Kaava 1 on esitetty kohdassa 2.1.

$$CEV_{\max} = 0,20 + \frac{1,65}{6} + \frac{0,3+0,2+0,12}{5} + \frac{0,5+0,35}{15}$$

$$CEV_{\max} = 0,66$$

$$CEV_{\min} = 0,14 + \frac{0,9}{6} + \frac{0+0,1+0,1}{5} + \frac{0,3+0}{15}$$

$$CEV_{\min} = 0,35$$

$$CEV_{ka} = 0,17 + \frac{1,275}{6} + \frac{0,15+0,15+0,11}{5} + \frac{0,4+0,175}{15}$$

$$CEV_{ka} = 0,50$$

### 2.3.2 Kuumahalkeilualttius laivanrakennusteräksille

Lasketaan kaavan 2 mukaan kuumahalkeilualttiudet laivanrakennusteräksille. Kaava 2 on esitetty kohdassa 2.1.

$$UCS_{max}=230 \times 0,20 + 190 \times 0,03 + 75 \times 0,035 + 45 \times 0,06 - 12,3 \times 0,5 - 6,5 \times 1,65 - 1$$

$$UCS_{max}=39,15$$

$$UCS_{min}=230 \times 0,14 + 190 \times 0,025 + 75 \times 0,03 + 45 \times 0,05 - 12,3 \times 0,5 - 6,5 \times 0,9 - 1$$

$$UCS_{min}=28,45$$

$$UCS_{ka}=230 \times 0,17 + 190 \times 0,0275 + 75 \times 0,0325 + 45 \times 0,055 - 12,3 \times 0,5 - 6,5 \times 1,275 - 1$$

$$UCS_{ka}=33,80$$

### 2.3.3 Myöstöhalkeilualttius laivanrakennusteräksille

Lasketaan kaavan 3 mukaan myöstöhalkeilualttiudet laivanrakennusteräksille.

Kaava 3 on esitetty kohdassa 2.1.

$$CS_{max}=0,3 + 3,3 \times 0,2 + 8,1 \times 0,12 - 2$$

$$CS_{max}=-0,07$$

$$CS_{min}=0 + 3,3 \times 0,1 + 8,1 \times 0,1 - 2$$

$$CS_{min}=-0,86$$

$$CS_{ka}=0,15 + 3,3 \times 0,15 + 8,1 \times 0,11 - 2$$

$$CS_{ka}=-0,46$$



### 2.3.4 Lamellirepeilyalttius laivanrakennusteräksille

Rikkipitoisuudet vaihtelevat välillä 0,025-0,03%, joten lamellirepeilyriski on olemassa.

### 2.4 Säänkestävät teräkset

Säänkestävien terästen yleisimmät käyttökohteet ovat säiliöt, kannatuspilarit, putkistosillat, hyppymäet ja melunsuoja-aidat. Hyvän säänkesto-ominaisuuden aikaansaamiseksi tavalliseen rakenneteräkseen lisätään pieniä määriä kuparia, kromia, nikkeliä ja mahdollisesti fosforia. Säänkestävät teräkset, jotka sisältävät fosforia ovat ilmastokorroosionkestävyydeltään parhaita. Fosfori heikentää kuitenkin teräksen sitkeyttä, joten sitä ei voi käyttää teräksissä joihin kohdistuu haurasmurtumavaara. Säänkestävien terästen pinnalla oleva tiivis oksidikerros (patina) estää teräksen lisähapettumisen ja se muodostuu teräksen pinnalle 18-36 kuukaudessa normaaleissa sääolosuhteissa. Säänkestävien terästen pinta on alkuvaiheessa punaruskean ruosteen peitossa ja ajan myötä sen väri tummenee. Lopullisen värisävyn määrää se, kuinka paljon ilmassa on epäpuhtauksia. (Rautaruukki, 1999, s.80-82)

Säänkestävien terästen kemialliset seosainepitoisuudet on esitelty standardissa SFS-EN 10025-5. Taulukossa 6 on esitelty standardinmukaiset maksimi-, minimi- ja keskiarvoiset seosainepitoisuudet.

*Taulukko 6. Säänkestävien terästen seosainepitoisuudet (SFS-EN 10025-5).*

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,16	0,12	0,14
Si	0,75	0,40	0,575
Mn	1,50	0,20	0,85
P	0,15	0,03	0,09
S	0,035	0,03	0,0325
N	0,009	0,009	0,009
Cr	1,25	0,30	0,775
Cu	0,55	0,25	0,40
Ni	0,65	0	0,325
Ti	0,10	0,02	0,06
Mo	0,30	0	0,15
Nb	0,06	0,015	0,0375
V	0,12	0,02	0,07

#### 2.4.1 Kylmähalkeilualltius säänkestäville teräksille

Lasketaan kaavan 1 mukaan hiilekvivalentit säänkestäville teräksille. Kaava 1 on esitetty kohdassa 2.1.

$$CEV_{\max}=0,16 + \frac{1,5}{6} + \frac{1,25+0,3+0,12}{5} + \frac{0,65+0,55}{15}$$

$$CEV_{\max}=0,82$$

$$CEV_{\min}=0,12 + \frac{0,2}{6} + \frac{0,3+0+0,02}{5} + \frac{0+0,25}{15}$$

$$CEV_{\min}=0,23$$

$$CEV_{ka}=0,14 + \frac{0,85}{6} + \frac{0,775+0,15+0,07}{5} + \frac{0,325+0,4}{15}$$

$$CEV_{ka}=0,53$$

#### 2.4.2 Kuumahalkeilualltius säänkestäville teräksille

Lasketaan kaavan 2 mukaan kuumahalkeilualltiudet säänkestäville teräksille. Kaava 2 on esitetty kohdassa 2.1.

$$UCS_{\max}=230 \times 0,16 + 190 \times 0,035 + 75 \times 0,15 + 45 \times 0,06 - 12,3 \times 0,75 - 6,5 \times 1,5 - 1$$

$$UCS_{\max}=37,43$$

$$UCS_{\min}=230 \times 0,12 + 190 \times 0,03 + 75 \times 0,03 + 45 \times 0,015 - 12,3 \times 0,4 - 6,5 \times 0,2 - 1$$

$$UCS_{\min}=29,01$$

$$UCS_{ka}=230 \times 0,14 + 190 \times 0,0325 + 75 \times 0,09 + 45 \times 0,0375 - 12,3 \times 0,575 - 6,5 \times 0,85 - 1$$

$$UCS_{ka}=33,22$$

#### 2.4.3 Myöstöhalkeilualttius säänkestäville teräksille

Lasketaan kaavan 3 mukaan myöstöhalkeilualttiudet säänkestäville teräksille. Kaava 3 on esitetty kohdassa 2.1.

$$CS_{max}=1,25 + 3,3 \times 0,3 + 8,1 \times 0,12 - 2$$

$$CS_{max}=1,21$$

$$CS_{min}=0,3 + 3,3 \times 0 + 8,1 \times 0,02 - 2$$

$$CS_{min}=-1,54$$

$$CS_{ka}=0,775 + 3,3 \times 0,15 + 8,1 \times 0,07 - 2$$

$$CS_{ka}=-0,16$$

#### 2.4.4 Lamellirepeilyalttius paineastiateräksille

Rikkipitoisuudet vaihtelevat välillä 0,03-0,035%, joten alttius lamellirepeilylle on suuri.

### 2.5 Lujat teräkset

Tässä työssä lujilla teräksillä tarkoitetaan teräksiä, joiden murtolujuus on minimissään noin 400 MPa. Lujien teräksien käyttöönotolla saavutetaan korkean lujuuden lisäksi muitakin etuja. Näitä etuja ovat esimerkiksi pienempi aineenpaksuus, keveys, pienempi lisääaineentuonti hitsauksessa, suurempi kulumiskestävyys ja valmistuskustannusten aleneminen. (Martikainen, 2011, s.182) Standardissa SFS-EN 10025-6+A1 on esitelty lujien rakenneterästen kemialliset ominaisuudet. Taulukossa 7 on esitelty lujien rakenneterästen seosainepitoisuudet standardin mukaisesti.

Taulukko 7. Lujien terästen seosainepitoisuudet (SFS-EN 10025-6+A1).

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,20	0,20	0,20
Si	0,80	0,80	0,80
Mn	1,70	1,70	1,70
P	0,025	0,02	0,0225
S	0,015	0,01	0,0125
N	0,015	0,015	0,015
B	0,0050	0,0050	0,0050
Cr	1,50	1,50	1,50
Cu	0,50	0,50	0,50
Mo	0,70	0,70	0,70
Nb	0,06	0,06	0,06
Ni	2,0	2,0	2,0
Ti	0,05	0,05	0,05
V	0,12	0,12	0,12
Zr	0,15	0,15	0,15

### 2.5.1 Kylmähalkeilualttius lujille teräksille

Lasketaan kaavan 1 mukaan hiiliekvivalentit lujille teräksille. Kaava 1 on esitetty kohdassa 2.1. Kyseiset arvot pysyvät tässä tapauksessa samana maksimiseostuksella, minimiseostuksella ja keskiarvossaan, joten laskut voidaan yhdistää seuraavasti.

$$CEV_{\max} = CEV_{\min} = CEV_{ka} = 0,2 + \frac{1,7}{6} + \frac{1,5+0,7+0,12}{5} + \frac{2,0+0,5}{15}$$

$$CEV_{\max} = CEV_{\min} = CEV_{ka} = 1,11$$

### 2.5.2 Kuumahalkeilualttius lujille teräksille

Lasketaan kaavan 2 mukaan kuumahalkeilualttiudet lujille teräksille. Kaava 2 on esitetty kohdassa 2.1.

$$UCS_{\max} = 230 \times 0,2 + 190 \times 0,015 + 75 \times 0,025 + 45 \times 0,06 - 12,3 \times 0,8 - 6,5 \times 1,7 - 1$$

$$UCS_{\max} = 31,54$$

$$UCS_{\min} = 230 \times 0,2 + 190 \times 0,01 + 75 \times 0,02 + 45 \times 0,06 - 12,3 \times 0,8 - 6,5 \times 1,7 - 1$$

$$UCS_{min}=30,21$$

$$UCS_{ka}=230 \times 0,2 + 190 \times 0,0125 + 75 \times 0,0225 + 45 \times 0,06 - 12,3 \times 0,8 - 6,5 \times 1,7 - 1$$

$$UCS_{ka}=30,87$$

### 2.5.3 Myöstöhalkeilualltius lujille teräksille

Lasketaan kaavan 3 mukaan myöstöhalkeilualltiudet lujille teräksille. Kaava 3 on esitetty kohdassa 2.1. Kyseiset arvot pysyvät tässä tapauksessa samana maksimiseostuksella, minimiseostuksella ja keskiarvossaan, joten laskut voidaan yhdistää seuraavasti.

$$CS_{max} = CS_{min} = CS_{ka} = 1,5 + 3,3 \times 0,7 + 8,1 \times 0,12 - 2$$

$$CS_{max} = CS_{min} = CS_{ka} = 2,78$$

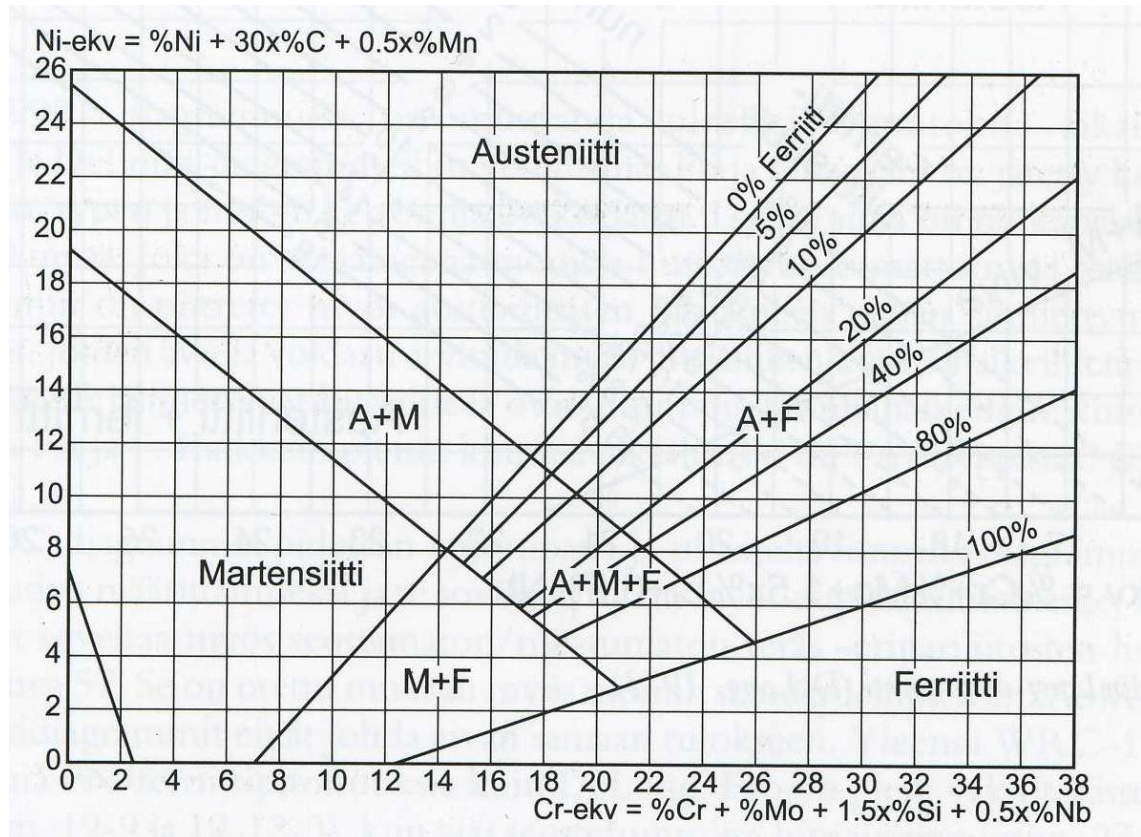
### 2.5.4 Lamellirepeilyalltius lujille teräksille

Rikkiptoisuudet vaihtelevat välillä 0,01-0,0125%, joten lamellirepeilyriski on suhteellisen pieni.

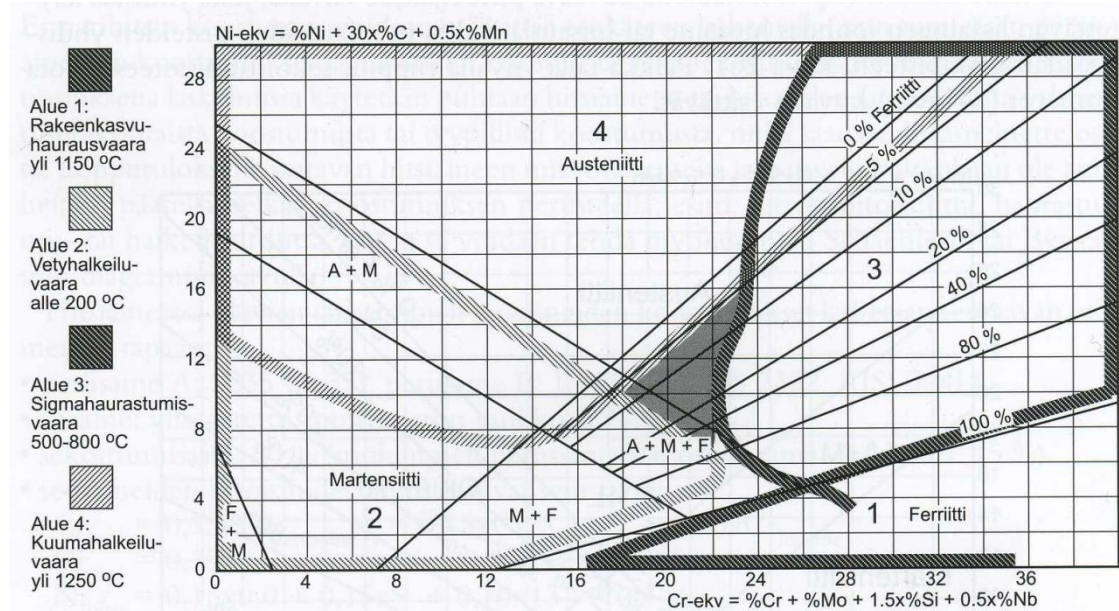
### 3 RUOSTUMATTOMAT JA HAPONKESTÄVÄT TERÄKSET

Ruostumattomiksi teräksiksi kutsutaan teräksiä, joiden kromipitoisuus on vähintään 10,5%. Kromipitoisuuden ansiosta teräksen pinnalle muodostuu passivaatiokerros, joka suojaa terästä korroosiolta. Passivaatiokerros kykenee uusiutumaan hapettavissa olosuhteissa rikkoontuessaankin. Ruostumattomat teräkset jakaantuvat neljään alalajiin, joita ovat austeniittiset, ferriittiset, austeniittis-ferriittiset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset. Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan austeniittisiä ruostumattomia teräksiä sekä austeniittisiä haponkestäviä teräksiä. (Koivisto et al., 2001, s. 144-145)

Austeniittisiä ruostumattomia sekä austeniittisiä haponkestäviä teräksiä arvioidaan erilaisten diagrammien avulla. Tässä työssä käytettäviä diagrammeja ovat Schaeffler-diagrammi ja Bystramin diagrammi. Schaeffler-diagrammi kertoo hitsauksessa syntyvän mikrorakenteen ja Bystramin diagrammista päätellään nikkeli- ja kromiekvivalentin avulla mahdollinen hitsausongelma. Schaeffler-diagrammi esitetään kuvassa 1 ja Bystramin diagrammi esitetään kuvassa 2.



Kuva 1. Schaeffler-diagrammi (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.79).



Kuva 2. Bystramin diagrammi (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.446).

Molempien diagrammien käyttö vaatii nikkeli- ja kromiekvivalentin laskemista. Nikkeliekvivalentti lasketaan kaavalla 4 ja kromiekvivalentti lasketaan kaavalla 5. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.79, s. 446)

$$Ni - ekv = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn \quad (4)$$

$$Cr - ekv = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb \quad (5)$$

Saatujen ekvivalenttiarvojen perusteella voidaan selvittää mahdollinen hitsausongelma Bystramin diagrammia käyttäen. Bystramin diagrammi jaetaan neljään osa-alueeseen. Nämä osa-alueet ovat rakeenkasvuhaurausvaara, vetyhalkeiluvaara, sigmahaurastumisvaara ja kuumahalkeiluvaara.

Rakeenkasvuvaara on pääosin ferriittisten ruostumattomien terästen ongelma. Hiilen vaikutuksesta teräkseen syntyy austeniittia lämpötilan ylittäessä 850°C. Teräksen jäähtyessä nopeasti austeniitti muuttuu martensiitiksi, joka haurastuttaa teräksen sekä suurentaa raekokoa. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.226)

Vetyhalkeamat syntyvät, kun hitsi on jäähtynyt 150°C alapuolelle ja ne voivat syntyä muutaman vuorokauden viiveellä. Vetyhalkeaman syntymiseksi tarvitaan kolmen tekijän samanaikaista olemassaoloa. Nämä tekijät ovat hauras mikrorakenne, vetypitoisuus sekä sisäiset jännitykset hitsissä. Vetyhalkeiluvaara on esimerkiksi martensiittisten ruostumattomien terästen ongelma. Martensiittisissä teräksissä suuri hiilipitoisuus mahdollistaa hauraan mikrorakenteen syntymisen. Vetyä joutuu hitsiin pääosin hitsauspuikon tai täytelangan päällysteestä, hitsausjauheesta tai hitsauspinnoilla olevista epäpuhtauksista. Vetyhalkeamaa kutsutaan myös nimellä kylmähalkeama, karkenemishalkeama ja viivästynyt halkeama. On tärkeää huomata, että ruostumattomien terästen kylmähalkeilua ei voida arvioida hiiliekvivalentin avulla, joka esiteltiin kohdassa 2.1. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.233-234)

Sigmahaurastumisvaara on yleinen teräksillä, joiden seosainepitoisuus on suuri. Rungas kromi- ja ferriittipitoisuus lisäävät taipumusta sigmahaurauteen.



Kromiekvivalentin ylittäessä 23% on vaara sigmahauraudelle olemassa. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.446)

Ruostumattomissa teräksissä esiintyy kahdenlaista kuumahalkeilua: jähmettymishalkeilua hitsiaineessa ja sulamishalkeilua perusaineessa. Hitsiaineeseen syntyvät jähmettymishalkeamat syntyvät hitsin keskelle hitsin suuntaisesti. Jähmettymishalkeamat johtuvat epäpuhtauksista, jotka kerääntyvät sulan keskelle hitsin jäähtyessä. Tärkeimmät epäpuhtaudet ovat rikki ja fosfori. Jäähtymisestä aiheutuneet vetojännitykset repivät hitsin keskellä olevan sulan auki ja muodostavat jähmettymishalkeaman. Jähmettymishalkeama voi sijaita hitsin pinnan alla tai ulottua pinnalle asti. Hitsiaineen ferriittipitoisuus laskee kuumahalkeiluriskiä, koska ferriitti sitoo epäpuhtauksia itseensä. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.102-103) Perusaineen sulamishalkeilua yksipalkohitsissä esiintyy vyöhykkeellä, joka sulaa osittain. Sulamishalkeamia kutsutaan myös HAZ-, mikro- tai hiushalkeamiksi. Perusaineen sulamishalkeilu aiheutuu teräksen epäpuhtauksista. Sulamishalkeamat muodostuvat useimmiten raerajoille ja niitä on vaikea havaita silmämääräisesti. Monipalkohitsauksessa sulamishalkeilu on yleisempää, koska uutta palkoa hitsattaessa aikaisempaan palkoon syntyy osittain sulanut vyöhyke. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.110)

### 3.1 Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat ylivoimaisesti eniten käytettyjä ruostumattomia teräksiä. Niiden hitsattavuus on yleisesti ottaen hyvä lähes kaikilla hitsausmenetelmillä. (Koivisto et al., 2001, s.145-146)

Standardissa SFS-EN 10088-1 määritellään austeniittisen ruostumattoman teräksen kemiallinen koostumus. Taulukossa 8 on esitelty austeniittisen ruostumattoman teräksen seosaineiden maksimi-, minimi- ja keskiarvopitoisuudet.

Taulukko 8. Austeniittisten ruostumattomien teräksien seosainepitoisuudet (SFS-EN 10088-1).

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,15	0,02	0,085
Si	2,0	0,25	1,125
Mn	2,0	2,0	2,0
P	0,045	0,025	0,035
S	0,35	0,01	0,135
N	0,22	0,10	0,16
Cr	26,0	16,0	21,0
Cu	1,0	0	0,50
Mo	0,80	0	0,40
Nb	1,0	0	0,50
Ni	22,0	6,0	14

### 3.1.1 Nikkeli- ja kromiekvivalentit austeniittisille ruostumattomille teräksille

Lasketaan kaavojen 4 ja 5 perusteella nikkeli- ja kromiekvivalentit seosaineiden ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$Ni - ekv_{\max} = 22,0 + 30 \times 0,15 + 0,5 \times 2,0$$

$$Ni - ekv_{\max} = 27,5$$

$$Ni - ekv_{\min} = 6,0 + 30 \times 0,02 + 0,5 \times 2,0$$

$$Ni - ekv_{\min} = 7,6$$

$$Ni - ekv_{ka} = 14 + 30 \times 0,085 + 0,5 \times 2,0$$

$$Ni - ekv_{ka} = 17,55$$

$$Cr - ekv_{\max} = 26,0 + 0,80 + 1,5 \times 2,0 + 0,5 \times 1,0$$

$$Cr - ekv_{\max} = 30,3$$

$$Cr - ekv_{\min} = 16,0 + 0 + 1,5 \times 0,25 + 0,5 \times 0$$

$$Cr - ekv_{\min} = 16,38$$

$$Cr - ekv_{ka} = 21,0 + 0,40 + 1,5 \times 1,125 + 0,5 \times 0,5$$

$$Cr - ekv_{ka} = 23,34$$

### 3.2 Austeniittiset haponkestävät teräkset

Austeniittisiä haponkestäviä teräksiä käytetään käyttökohteissa, joissa on vaikeat korroosio-olosuhteet. Teräksen suurella seostuspitoisuudella on parannetaan korroosionkestoa ja erityisesti molybdeenin lisääminen parantaa korroosionkestokykyä. Haponkestävissä teräksissä molybdeenia on selvästi enemmän kuin austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä. (Kyröläinen&Lukkari, 2002, s.158) Taulukossa 9 on esitetty austeniittisten haponkestävien terästen seosainepitoisuuksia standardin SFS-EN 10088-1 perusteella.

*Taulukko 9. Austeniittisten haponkestävien terästen seosainepitoisuudet (SFS-EN 10088-1).*

Seosaine	Maksimipitoisuus	Minimipitoisuus	Keskiarvo
C	0,08	0,02	0,05
Si	1,00	0,50	0,75
Mn	7,00	1,00	4,0
P	0,045	0,025	0,035
S	0,015	0,010	0,0125
N	0,60	0,08	0,34
Cr	28,0	16,5	22,25
Cu	3,50	0	1,75
Mo	7,0	2,0	4,5
Nb	1,0	0	0,5
Ni	32,0	10,0	21,0

#### 3.2.1 Nikkeli- ja kromiekvivalentit austeniittisille haponkestäville teräksille

Lasketaan kaavojen 4 ja 5 perusteella nikkeli- ja kromiekvivalentit haponkestäville teräksille seosaineiden ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan.

$$Ni - ekv_{\max} = 32,0 + 30 \times 0,08 + 0,5 \times 7,0$$

$$Ni - ekv_{\max} = 37,9$$

$$Ni - ekv_{\min} = 10,0 + 30 \times 0,02 + 0,5 \times 1,0$$

$$Ni - ekv_{\min} = 11,1$$

$$Ni - ekv_{ka} = 21 + 30 \times 0,05 + 0,5 \times 4,0$$

$$Ni - ekv_{ka} = 24,5$$

$$Cr - ekv_{\max} = 28,0 + 7,0 + 1,5 \times 1,0 + 0,5 \times 1,0$$

$$Cr - ekv_{\max} = 37,0$$

$$Cr - ekv_{\min} = 16,5 + 2,0 + 1,5 \times 0,5 + 0,5 \times 0$$

$$Cr - ekv_{\min} = 19,25$$

$$Cr - ekv_{ka} = 22,25 + 4,5 + 1,5 \times 0,75 + 0,5 \times 0,5$$

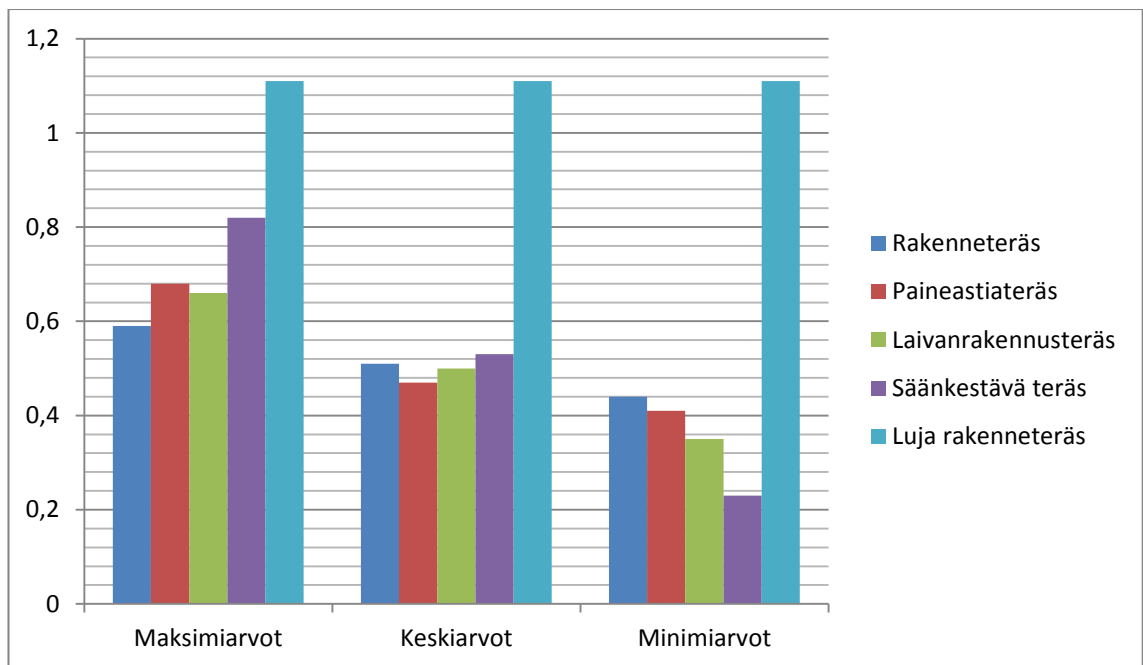
$$Cr - ekv_{ka} = 28,13$$

## 4 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa kootaan työssä saadut tulokset. Tulosten esittäminen aloitetaan seostamattomista ja niukkaseosteisista teräksistä, jonka jälkeen esitetään ruostumattomien ja haponkestävien terästen tulokset. Tulokset esitetään jokaisen hitsausvirheen kannalta erikseen.

### 4.1 Kylmähalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille

Kappaleessa 2 laskettiin yleisille rakenneteräksille, paineastiateräksille, laivanrakennusteräksille, säänkestäville teräksille ja lujille rakenneteräksille hiiliekvivalentit seostuksen ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan, jotta voitaisiin arvioida riskiä kylmähalkeiluun. Kuvassa 3 on koottu saadut tulokset.



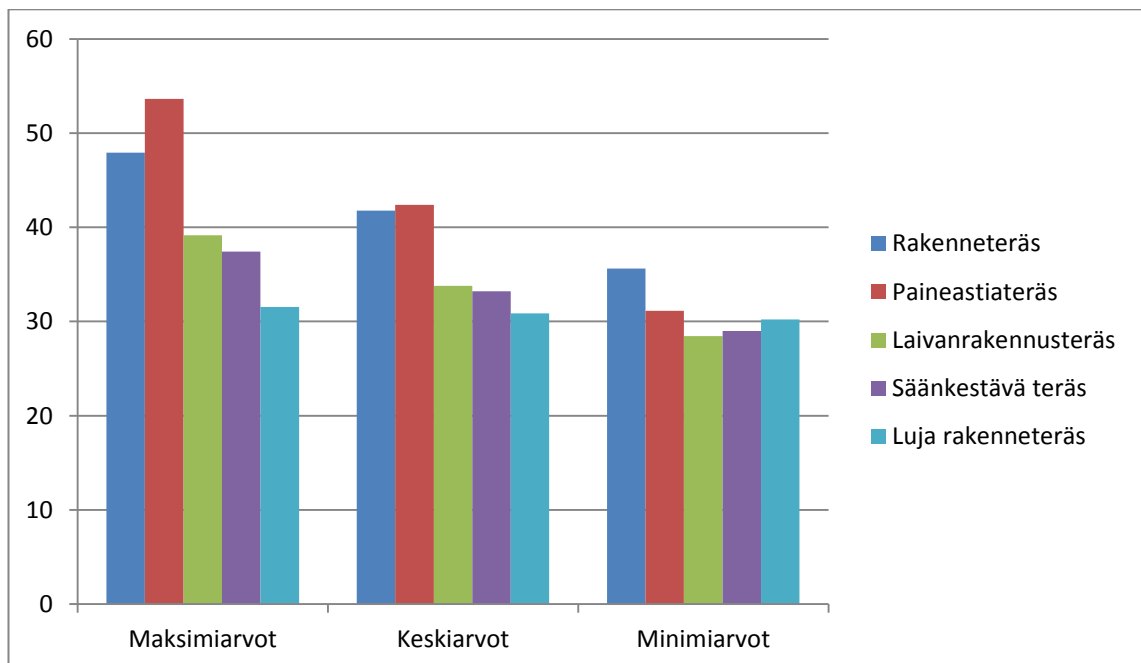
**Kuva 3.** Eri seostuspitoisuuksilla lasketut hiiliekvivalentit.

Kuvasta 3 nähdään, että seosainepitoisuuksien ollessa maksimiarvossaan on CEV kaikilla teräksillä selvästi yli arvon 0,45. CEV:n ollessa yli 0,45 vaaditaan esilämmitystä

ja riski kylmähalkeiluun on suuri. Seostuksen ollessa keskiarvossaan CEV on vieläkin selvästi yli 0,45. Hiiliäkvivalentit ovat kuitenkin selvästi pienemmät kuin maksimiarvoilla, joten riski kylmähalkeiluun on pienentynyt, mutta edelleen on suuri riski kylmähalkeiluun. Seosaineiden ollessa minimissään paineastiateräksien, laivanrakennusteräksien sekä säänkestävien terästen hiiliäkvivalentit ovat alle 0,41, joka takaa hyvän hitsattavuuden. Yleisten rakenneterästen  $CEV=0,44$  takaa hyvän hitsattavuuden, kun käytössä on kuivat emäspäälysteiset hitsausaineet. Lujien teräksien hitsattavuus säilyi huonona kylmähalkeiluriskiä nähden kaikilla seostusarvoilla. Taulukosta havaitaan, että erityisesti säänkestävien terästen hitsattavuus kylmähalkeiluriskiä nähden pieneni oleellisesti seosainepitoisuuksien pienentyessä.

#### 4.2 Kuumahalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille

Kappaleessa 2 laskettiin jokaiselle teräkselle kuumahalkeamaa kuvaava herkkyysindeksi kaavalla 2. Kuvaan 4 on koottu saadut tulokset eri teräksille.

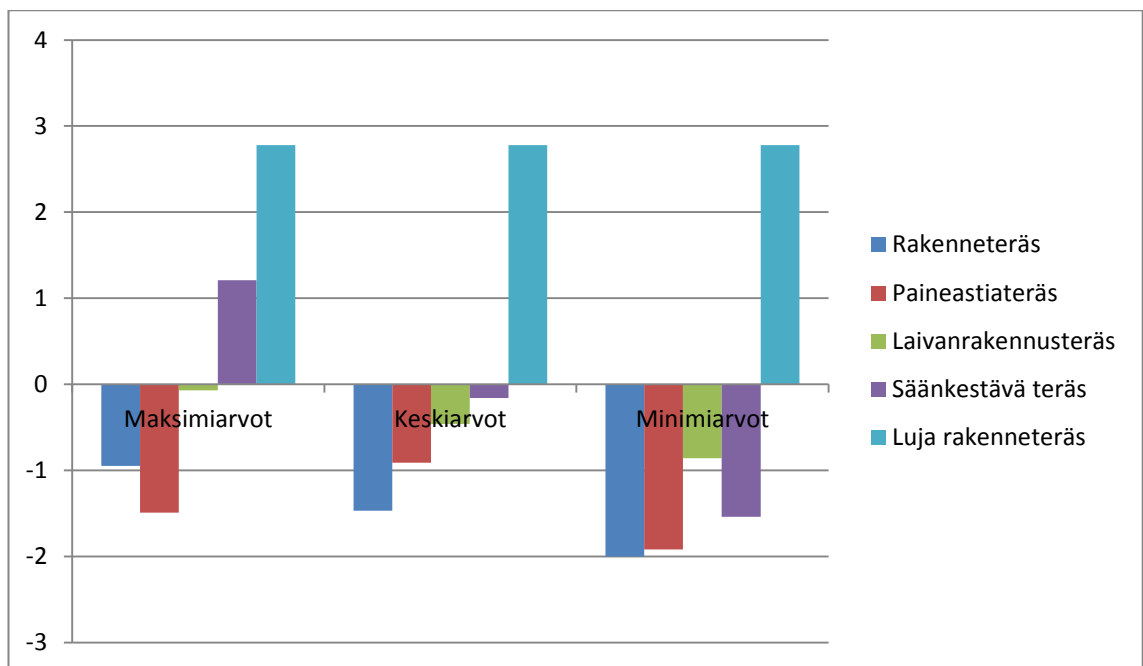


**Kuva 4.** Kuumahalkeamisriskiä kuvaavat herkkyysindeksit eri seosainepitoisuuksilla.

Kuvasta 4 havaitaan, että UCS-indeksi ei saa missään olosuhteissa pienempää arvoa kuin 10. Kaikkien teräksien UCS-indeksit saivat maksimiarvoillaan ja keskiarvoillaan arvoksi yli 30, jolloin aineilla on huono vastustuskyky halkeilua vastaan. Vasta minimiarvoilla UCS-indeksi sai säänkestävillä teräksillä ja laivanrakennusteräksillä arvon, joka oli alle 30. Tämä ei kuitenkaan radikaalisti vaikuta hitsattavuuteen, koska halkeamistaipumus on edelleen suuri.

#### 4.3 Myöstöhalkeilutulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille

Kappaleessa 2 on laskettu myöstöhalkeilualttiudet eri teräksille kaavalla 3. Kuvaan 5 on koottu saadut tulokset.

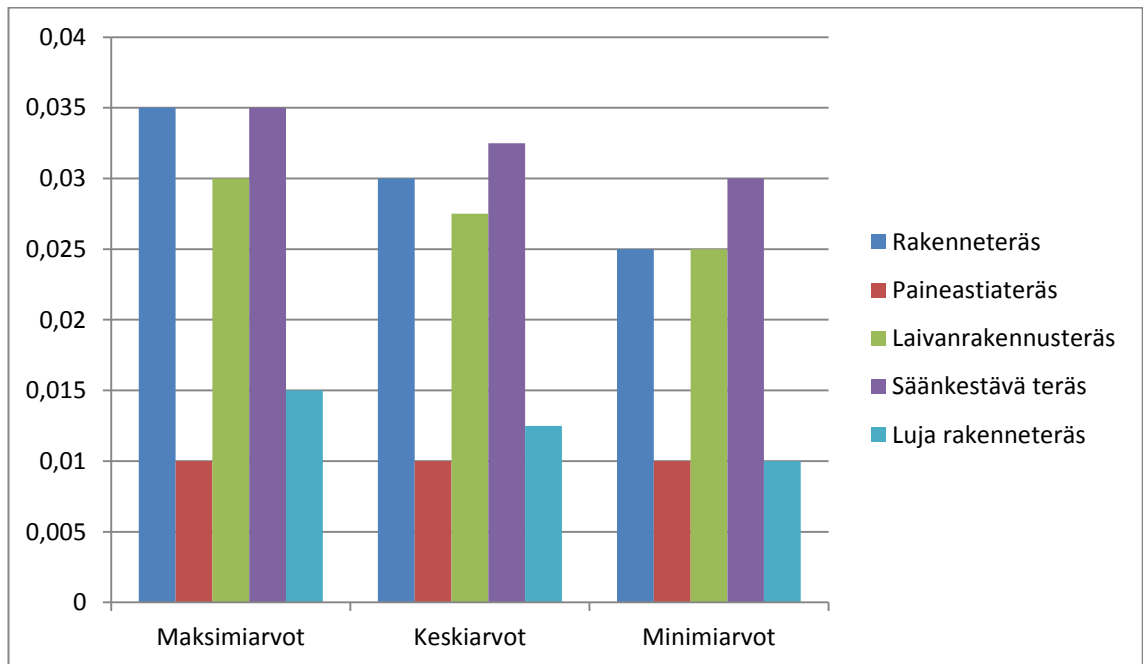


**Kuva 5.** Myöstöhalkeilualttiudet teräksille eri seosainepitoisuuksilla.

Kuvasta 5 havaitaan, että suurin todennäköisyys myöstöhalkeiluun on lujalla rakenneteräksellä. Lujan teräksen todennäköisyys myöstöhalkeiluun säilyy samana, vaikka seosainepitoisuudet muuttuvat. Yleisesti muiden teräksien kannalta myöstöhalkeiluvaara on pieni, lukuun ottamatta säänkestävää terästä, kun seosainepitoisuudet ovat maksimissaan.

#### 4.4 Lamellirepeilytulokset seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille

Lamellirepeilyalttiutta pidetään pienenä mikäli rikki-pitoisuus on alle 0,007%. Kuvaan 6 on koottu kaikista teräksistä rikki-pitoisuudet seosainepitoisuuden muuttuessa.



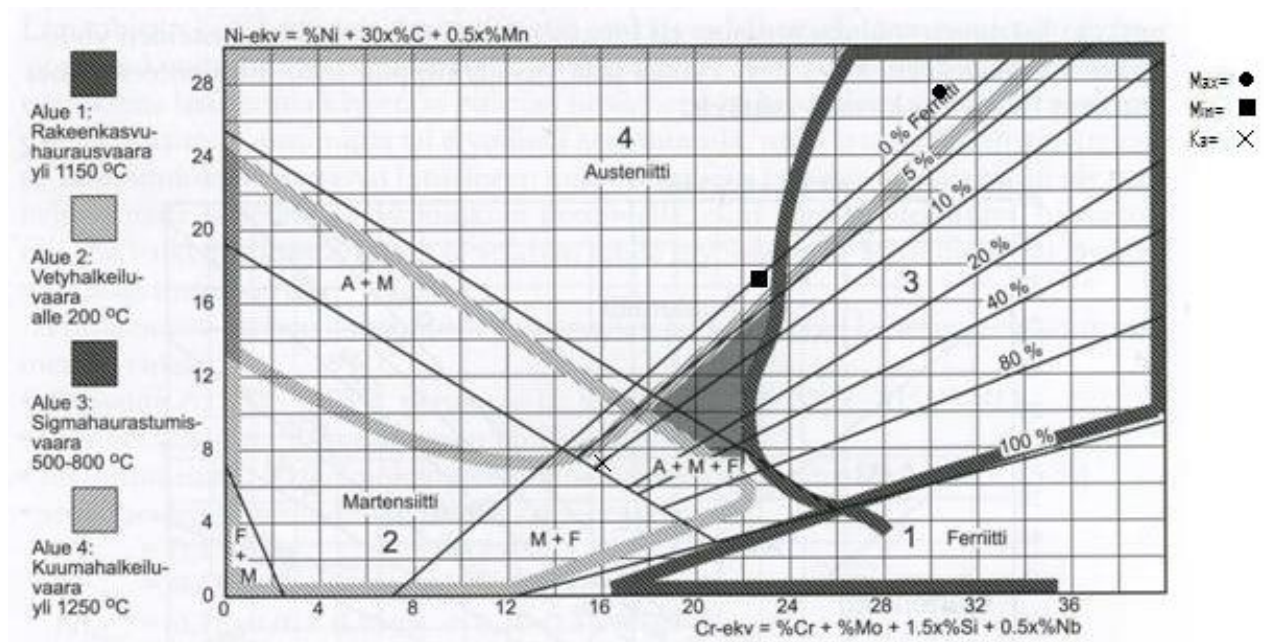
**Kuva 6.** Rikki-pitoisuudet teräksille eri seosainepitoisuuksilla.

Taulukosta 13 nähdään, että rikki-pitoisuudet ovat kaikilla teräksillä seostuksesta riippumatta yli 0,007%. Kaikilla teräksillä on siis lamellirepeilyriski. Kuitenkin esimerkiksi paineastiateräksien ja rakenneteräksien välillä rikki-pitoisuus vaihtelee suuresti.



#### 4.5 Austeniittisten ruostumattomien terästen tulokset

Kappaleessa 3.1 laskettiin austeniittisille ruostumattomille teräksille nikkeli- ja kromiekvivalentit seosainepitoisuuksien ollessa maksimissaan, minimissään ja keskiarvossaan. Kuvassa 7 olevaan Bystramin diagrammiin on merkitty saadut tulokset eri seosainepitoisuuksille.

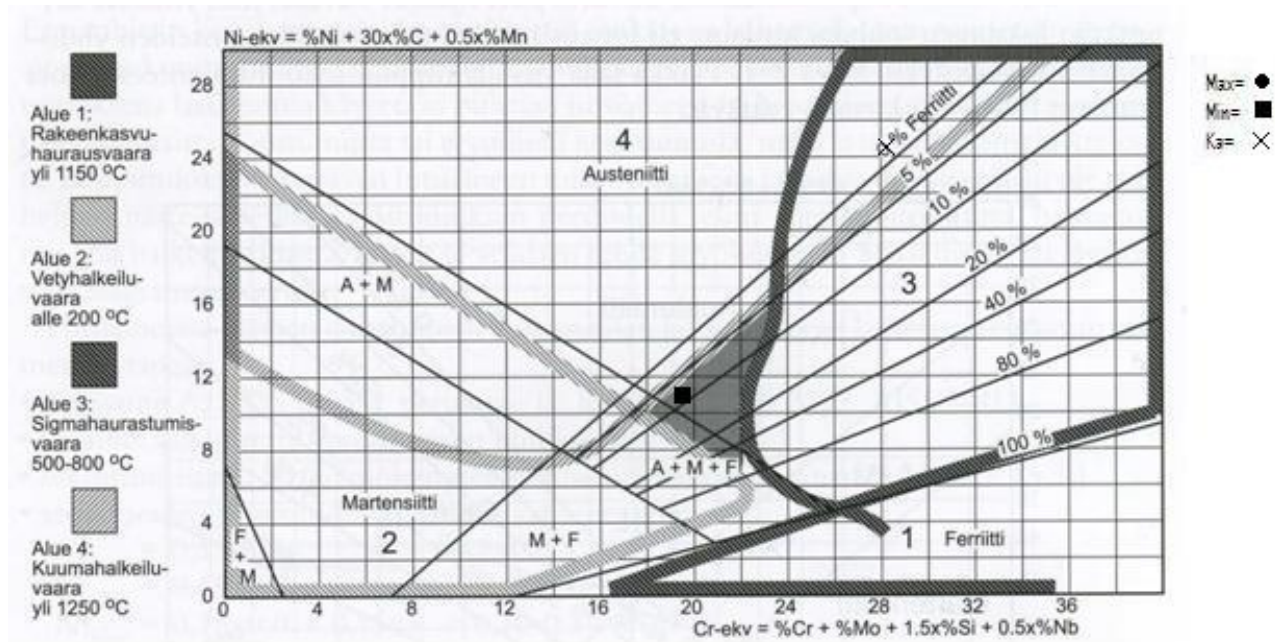


**Kuva 7.** Bystramin diagrammi tuloksineen.

Kuvasta 7 havaitaan, että seosainepitoisuuksien ollessa maksimissaan riskinä on sigmahaurastumisvaara. Minimipitoisuuksilla hitsauksessa on vaarana vetyhalkeilu ja seostuksen ollessa keskiarvossaan vaarana on kuumahalkeilu.

#### 4.5 Austeniittisten haponkestävien terästen tulokset

Kappaleessa 3.2 laskettiin kromi- ja nikkeli- ja kromiekvivalentit austeniittisille haponkestäville teräksille. Kuvassa 8 olevaan Bystramin diagrammiin on merkitty laskuista saadut tulokset.



**Kuva 8.** Bystramin diagrammi tuloksineen.

Kuvasta 8 havaitaan, että maksimiarvoilla saadut ekvivalentit eivät mahdu edes kuvaan. Seospitoisuudella on siis erittäin suuri merkitys austeniittisille haponkestäville teräksille. Minimiarvoilla saadaan päästään kuvan keskellä olevaan kolmioon, joka on hitsauksen kannalta hyvä alue. Seostuksen ollessa keskiarvossaan joudutaan sigmahaurausalueelle, jossa on vain hieman ferriittiä.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskettujen hiiliekvivalenttien arvojen perusteella voidaan todeta, että saadun hiiliekvivalentin arvo riippuu oleellisesti seostuksesta. Hiilen määrä vaikuttaa merkittävästi syntyvän hiiliekvivalentin arvoon, ja kaikilla tässä työssä tarkastelussa olleilla teräksillä hiiliekvivalentti pieneni rajusti seostuksen pienentyessä, lukuun ottamatta lujia teräksiä. Kuumahalkeilualttiutta kuvaava UCS-indeksi ei reagoi yhtä voimakkaasti seosainepitoisuuksien muutoksiin kuin hiiliekvivalentti, mutta kuitenkin esimerkiksi laivanrakennusteräksien vastustuskyky halkeilua vastaan parantui merkittävästi. Useimmilla tarkastelussa olleilla teräksillä riski myöstöhalkeiluun oli seostuksen maksimiarvoillakin pieni, mutta seostuksen vähentäminen paransi entisestään myöstöhalkeilun vastustuskykyä. Poikkeuksena voidaan kuitenkin pitää lujia teräksiä, joilla riski myöstöhalkeiluun pysyi muuttumattomana. Riski lamellirepeilyyn pysyi kaikilla teräksillä seostuksesta riippumatta, kuitenkin teräksien keskinäiset erot voivat olla suuriakin. Seosainepitoisuuksien vaihtelu austeniittisten ruostumattomien terästen yhteydessä vaikutti merkittävästi syntyvään hitsausongelmaan. Seosainepitoisuuksien ollessa keskiarvossaan ja minimissään päädyttiin kuitenkin Bystramin diagrammissa lähelle toivottua keskikolmiota. Austeniittisillä haponkestävillä teräksillä seosainepitoisuuksien vaihtelu oli myös suurta. Maksimiarvoilla lasketut ekvivalentit eivät mahdu Bystramin diagrammiin ollenkaan, kun taas minimiarvoilla päädytään keskikolmioon.

## 6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen sekä ruostumattomien ja haponkestävien terästen hitsattavuutta eri seosainepitoisuuksilla. Työssä laskettujen arvojen perusteella voidaan todeta, että teräksen hitsattavuus saattaa muuttua merkittävästi vaikka teräs olisi valmistettu standardien suomissa rajoissa. Seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen osalta suurimmat vaihtelut tulivat hiiliekvivalentille ja UCS-indeksille. Tämä on tärkeä huomata, koska suuri osa mustien terästen hitsaukseen liittyvistä ongelmista liittyy nimenomaan kylmä- ja kuumahalkeiluun. Austeniittisen ruostumattoman teräksen seosainepitoisuuksien vaihtelu muutti selkeästi hitsauksessa syntyvää uhkaa, mutta austeniittisen haponkestävän teräksen seosainepitoisuuksien vaihtelu vaikutti vielä suuremmin syntyviin hitsausuhkiin. Edellä mainittujen tuloksien perusteella terästuotteen tilaajan on perehdyttävä huolellisesti tuote-erän aineodistukseen hitsausongelmien välttämiseksi.

## LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. Koneenosien suunnittelu. 1. painos. Juva: WSOY, 1995. 796 s. ISBN 951-0-20172-3.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J. Konetekniikan materiaalioppi. 9. painos. Helsinki: Edita Oy, 2001. 336s. ISBN 951-37-2912-5.

Kyröläinen, A., Lukkari, J. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. 2. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy, 2002, 526 s. ISBN 951-817-794-5.

Lancaster, J.F. Metallurgy of welding. 3. painos. Lontoo: George Allen & Unwin LTD, 1980. 254 s. ISBN 0-04-669008-5.

Martikainen, J. 2011. Hitsausmetallurgia, luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 540 s.

Rautaruukki. Hitsaajan opas. 2. painos. Keuruu: Otava Oy, 1997. 96 s. ISBN 952-5010-18-X.

Rautaruukki. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. 2. painos. Keuruu: Otava Oy, 1999. 128 s. ISBN 952-5010-29-5.

SFS-EN 1011-2 Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2001. 113 s.

SFS-EN 10020 Teräslajien määritelmät ja luokittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2000. 15 s.

SFS-EN 10025-2 Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2004. 65 s.

SFS-EN 10025-5 Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 5: Ilmastokorroosiota kestävät rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2005. 45 s.

SFS-EN 10028-2 Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2009. 46s.

SFS-EN 10225 Weldable structural steels for fixed offshore structures. Technical delivery conditions. Helsinki: Suomen standardoimisliitto, 2009. 76 s.

Valmet Oy. Raaka-ainekäsikirja. Muokatut teräkset. 1. painos. Tampere: Satapaino, 1984. 308 s. ISBN 951-95880-4-3.

Valorinta, V. Koneenrakentajan metallioppi. 1. painos. Tampere: Tampereen kirjapaino Oy Tamprint, 1983. 261s. ISBN 951-9316-22-1.