

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

*Erno Kuokka*

**LUJIEN HITSATTAVIEN TERÄSTEN KÄYTTÄYTYMINEN -60 °C:SSA**

Työn tarkastajat:

Professori Jukka Martikainen

DI Markku Pirinen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

Erno Kuokka

### **Lujien hitsattavien terästen käyttäytyminen -60 °C:ssa**

Diplomityö

2013

77 sivua, 37 kuvaa, 20 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Jukka Martikainen

DI Markku Pirinen

Hakusanat: arktinen alue, hienoraeteräs, hitsaus, iskusitkeys, matala lämpötila

Opinnäytetyö on osa Arctic Materials Technologies Development -projektia, jonka tavoitteena on kehittää perusteita arktisten alueiden sovelluksiin suunnittelun ja valmistuksen kannalta. Arktisella alueella sijaitsee useita potentiaalisia öljy- ja maakaasuesiintymiä, joiden hyödyntäminen tulee vuosi vuodelta kannattavammaksi ilmaston lämpenemisestä johtuvan merijään heikkenemisen vuoksi. Alin suunnittelulämpötila arktisilla alueilla on -60 °C, mikä aiheuttaa haasteita sekä materiaalinvalinnalle että hitsaukselle.

Ferriittisillä teräksillä esiintyy lämpötilasta riippuvaa sitkeyden vaihtelua, jota kutsutaan transiitiokäyttäytymiseksi. Lämpötilan laskiessa teräksen iskusitkeys sekä murtumissitkeys laskevat. Arktisissa sovelluskohteissa käytetään yleisesti niukkaseosteisia, mikrooseostettuja hienoraeteräksiä, joille on ominaista erinomaiset sitkeys-, lujuus- sekä hitsattavuusominaisuudet vaativissakin olosuhteissa. Lujat termomekaanisesti valssatut ja nuorutetut hienoraeteräkset kattavat myötölujuusluokat 355...700 MPa. Tutkimuksissa on saatu vaihtelevia tuloksia materiaalien isku- ja murtumissitkeydestä -60 °C:ssa. Erityisesti sitkeysominaisuudet hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen alueiden välillä ovat vaihtelevia. Pienemmällä lämmöntuonnilla ja seostetuilla lisäaineilla saavutetaan kuitenkin pääsääntöisesti parempia sitkeysarvoja. Asikulaarinen ferriitti sekä alabainiitti ovat toivottavia mikrorakenteita liitoksessa, niiden pienen raekoon johdosta.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Mechanical Engineering

Erno Kuokka

### **Behavior of weldable high-strength steels in -60 °C temperature**

Master's Thesis

2013

77 pages, 37 figures, 20 tables

Examiners: Professor Jukka Martikainen  
M.Sc. (Tech) Markku Pirinen

Keywords: arctic regions, fine-grain steel, impact toughness, low temperature, welding

This thesis is part of the Arctic Materials Technologies Development project, which aims to develop guidelines for the design and production of applications in arctic areas. Considerable reserves of untapped oil and gas have been found in the Arctic. The utilization of these resources becomes more economical each year due to the thinning of sea ice caused by environmental changes. The minimum design temperature in the arctic is -60 °C, which challenges material selection and welding.

Ferritic materials exhibit a temperature dependent change in the toughness properties, called transition behavior. In lower temperatures the impact toughness and fracture toughness of ferritic steels deteriorate. High strength steel is a common material of choice in arctic applications. Microalloyed fine-grain steels guarantee excellent toughness, strength and welding properties. High-strength low-alloy steels, i.e. thermomechanically rolled or quenched and tempered steels, come in a yield strength range of 355...700 MPa. Existing studies show varying results on the impact and fracture toughness properties of HSLA steels in -60 °C. There is also considerable variation between the weld metal and the different HAZ areas. Lower heat input and high alloy consumables tend to produce tougher welds. Acicular ferrite and lower bainite are desirable microstructures due to their fine-grained structure.

## SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>9</b>
1.1	Työn tausta.....	9
1.2	Työn tavoite ja rajaus.....	10
<b>2</b>	<b>ARKTISET ALUEET .....</b>	<b>10</b>
2.1	Sovelluskohteet .....	12
2.2	Teräsrakentaminen.....	14
<b>3</b>	<b>LUJAT HITSATTAVAT TERÄKSET .....</b>	<b>15</b>
3.1	Termomekaanisesti valssatut teräkset .....	17
3.2	Niukkaseosteiset nuorrutusteräkset .....	21
<b>4</b>	<b>TERÄSTEN KÄYTTÄYTYMINEN MATALISSA LÄMPÖTILOISSA .....</b>	<b>23</b>
4.1	Teräksen transitiokäyttäytyminen.....	23
4.2	Teräksen murtuminen.....	24
4.2.1	Sitkeä murtuma .....	25
4.2.2	Haurasmurtuma.....	25
4.3	Haurasmurtuman edellytysten testausmenetelmät.....	27
4.3.1	Charpy-iskukoe.....	28
4.3.2	Muita testausmenetelmiä.....	29
4.4	Murtumismekaniikka .....	29
4.4.1	Säröjännitykset.....	30
4.4.2	Jännitysintensiiteettikerroin ja murtumissitkeys.....	31
4.5	Sitkeyteen vaikuttavat tekijät.....	34
4.5.1	Tiivistäminen.....	35
4.5.2	Raekoon vaikutus .....	35
4.5.3	Seosaineiden vaikutus.....	35
4.5.4	Kylmämuokkaus ja myötövanheneminen.....	38
4.5.5	Lämpökäsittelyn vaikutus.....	40
<b>5</b>	<b>HITSAUS MATALASSA LÄMPÖTILASSA .....</b>	<b>40</b>
5.1	Lämmötuonti.....	41
5.2	Jäähtymisaika.....	43
5.3	Kylmähalkeilu .....	46

5.4	Hitsausprosessit .....	50
5.5	Lisäaineet .....	50
<b>6</b>	<b>TUTKIMUSTULOKSIA .....</b>	<b>51</b>
6.1	Yleiset hienoraeteräkset .....	51
6.1.1	$R_e = 355$ MPa .....	52
6.1.2	$R_e = 420$ MPa .....	55
6.1.3	$R_e = 460$ MPa .....	57
6.2	Putkiteräkset.....	60
<b>7</b>	<b>SOVELLUSKOHTEET .....</b>	<b>63</b>
7.1	Shtokman .....	63
7.2	Sakhalin-2 .....	66
7.3	Fesco Sakhalin .....	67
<b>8</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSIÄ .....</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>70</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>73</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\delta$	CTOD-arvo [mm]
$\rho$	tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\sigma$	nimellisvetojännitys [MPa]
$\sigma_m$	maksimijännitys [MPa]
a	ellipsin akseli [m]
$A_5$	murtovenymä [%]
Al	alumiini
b	ellipsin akseli [m]
B	boori
C	hiili
CE	hiiliekvivalentti [%]
CET	hiiliekvivalentti [%]
Cr	kromi
Cu	kupari
E	hitsausenergia [kJ/mm]
HV	Vickers-kovuus
HV10	Vickers-kovuus mitattuna 10 kg:n painolla
I	virta [A]
K	jännitysintensiiteettikerroin
$K_c$	murtumissitkeys [ $\text{MPa m}^{1/2}$ ]
$K_I$	jännitysintensiiteettikerroin
$K_{Ic}$	murtumissitkeys tasovenymätilassa [ $\text{MPa m}^{1/2}$ ]
$K_t$	loven muotoluku
$K_V$	Charpy V -iskuenergia [J]
Mn	mangaani
Mo	molybdeeni
N	typpi
Nb	niobi
Ni	nikkeli
P	fosfori
$P_{cm}$	säröparametri [%]
Q	lämmöntuonti [kJ/mm]
$R_e$	myötölujuus [MPa]
$R_{eH}$	ylempi myötöraja [MPa]

$R_{eL}$	alempi myötöraja [MPa]
$R_m$	murtolujuus [MPa]
s	ainepaksuus [mm]
Si	pii
Sn	tina
$t_{3/5}$	jäähtymisaika (800...500 °C) [s]
T	lämpötila [°C]
$T_{kond.}$	kastepiste [°C]
$T_{max}$	enimmäislämpötila
$T_{p\ CET}$	CET-hiiliäkvivalentin mukainen esikuumennuslämpötila
Ti	titaani
U	jännite [V]
V	vanadiini
Z	murtokurouma [%]

AC	air cooling
ACC	accelerated cooling
AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
AWS	American Welding Society
CAFF	Conervation of Arctic Flora and Fauna
CE	carbon equivalent
CR	control rolling
CT	compact tension
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DQ	direct quenched
DT	Dynamic Tearing
DWT	Drop Weight Test
EN	European Standard
FL	fusion line
HAZ	heat-affected zone
HSLA	high-strength low-alloy
IIW	International Institute of Welding
ISO	International Organization for Standardization
ITT	Impact Transition Temperature
MAG	metal active gas

QT	quenched & tempered
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TMCP	Thermomechanical Control Process
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
WM	weld metal



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Tämä diplomityö tehtiin osana Arctic Materials Technologies Development -projektia, joka on South-East Finland-Russia ENPI CBC programme 2007–2013 ohjelmaan kuuluva hanke. Hanke suoritetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston sekä Pietarissa sijaitsevan Central Research Institute of Structural Materials (PROMETHEY) tutkimuslaitoksen kesken. Projektin tavoitteena on määrittellä turvallisuuden ja ekologisuuden näkökulmista perusteet arktisen alueen energiateollisuudessa käytettävien rakenteiden suunnitteluun ja valmistukseen. Projektissa kehitetään lisäksi hitsattuihin teräsrakenteisiin perustuvia sovelluksia arktisiin käyttökohteisiin, kuten jäänmurtajiin, rahtilaivoihin, öljy- ja maakaasulauttoihin sekä -putkistoihin ja tuulivoimaloihin.

Arktisille alueille kohdistuu kiinnostusta useista syistä. Tärkeimpänä on siellä sijaitsevien suurten öljy- ja maakaasuesiintymien hyödyntäminen olemassa olevien esiintymien ehtyessä. Jopa 13 % maapallon hyödyntämättömistä öljyvaroista ja 30 % maakaasuvaroista saattaa sijaita arktisilla alueilla. Fossiilisten polttoaineiden lisäksi alueella on valtava tuulienergiapotentiaali. Vaikka suuri osa energialähteistä sijaitsee rannikoilla meren pohjassa, ilmaston lämpenemisestä johtuva merijään heikkeneminen mahdollistaa useiden alueiden tehokkaan hyödyntämisen. Energiateollisuuden lisäksi pohjoiset alueet kiinnostavat kuljetusteollisuutta merijään heikkenemisestä johtuvan uusien merireittien avautumisen vuoksi. Koillisväylän avautuminen tarjoaa uuden laivayhteyden Atlantin ja Tyynen valtameren välille. Lisäksi Pohjois-Amerikan pohjoispuolelta kulkeva Luoteisväylä on herättänyt kiinnostusta. Seuraavina vuosikymmeninä merijään oheneminen saattaa lisäksi mahdollistaa merikuljetukset Pohjoisnavan ylitse. (Lausala & Jumppanen 2002, s. 3)

Arktisilla alueilla käytettäviin rakenteisiin kohdistuvat huomattavasti suuremmat ja moniulotteisemmat materiaalivaatimukset kuin lämpimillä alueilla ja sisämaassa. Päälimmäisenä ongelmana on matala lämpötila, sillä arktisilla alueilla lämpötila saattaa laskea jopa -60 °C:een. Muita huomioon otettavia asioita ovat esimerkiksi jään, lumen ja tuulen aiheuttamat dynaamiset kuormitukset, merivesikorrosio ja jäävuoret ja -lautat offshore-rakenteissa sekä rouhan vaikutus putkistoihin. Myös rakenteiden eristys- ja ilmanvaihtoratkaisut tulee suunnitella huolella meriveden, jään ja lumen aiheuttamien ongelmien minimoimiseksi. Mahdolliset riskit ovat arktisilla alueilla lisäksi huomattavasti suuremmat. Kohteet voivat sijaita erittäin kaukaisilla alueilla, jolloin välimatkat ja olosuhteet vaikeuttavat kuljetuksia sekä huolto- ja korjaustoimenpiteitä. Arktinen luonto on lisäksi erittäin haavoittuva ja useat lajit ovat uhanalaisia.

Näistä syistä johtuen mahdollisessa vauriotapauksessa vahingot ympäristölle sekä toimenpiteistä johtuvat kulut voivat nousta hyvin suuriksi.

## 1.2 Työn tavoite ja rajaus

Diplomityön tavoitteena on tarjota selkeä katsaus arktisilla alueilla käytössä olevista länsimaisista teräksistä, niiden sitkeysominaisuuksista vähintään -60 °C:ssa ja käyttökohteista. Työssä rajoitutaan lujiin hitsattaviin teräksiin myötölujuusalueella 355...700 MPa. Käytännössä näihin kuuluvat niukkaseosteiset, mikroseostetut kontrolloidusti ja termomekaanisesti valssatut sekä nuorrutetut hienoraeteräkset. Työn sisältöön kuuluu lyhyt katsaus arktisiin alueisiin ja niiden mahdollisuuksiin, selvitys teräksen yleisestä käyttäytymisestä matalissa lämpötiloissa ja hitsauksessa huomioon otettavista asioista, selvitys nykyisin käytössä olevista länsimaisista materiaaleista ja niistä suoritetuista tutkimuksista sitkeys- ja lujuusominaisuuksien kannalta sekä olemassa olevia sovelluksia käsittelevä osuus.

Työn alussa käydään lyhyesti läpi arktisen alueen määritelmiä ja sovelluskohteita. Seuraavassa kappaleessa käsitellään käytettäviä materiaaleja, niiden valmistusmenetelmiä ja toimintutiloja sekä ominaisuuksia arktisten alueiden käyttökohteiden kannalta. Teräksen ominaisuuksia käsittelevässä teoriaosassa keskitytään ferriittisten terästen transitiokäyttäytymiseen ja sitkeysominaisuuksiin vaikuttaviin tekijöihin sekä yksinkertaisiin murtumismekaniikan ja lujuusopin keinoihin materiaalivalinnassa. Hitsausta käsittelevässä kappaleessa selvitetään huomioon otettavia asioita matalassa lämpötilassa suoritettavassa hitsauksessa, hitsausparametreja sekä hitsausliitokseen vaikuttavia tekijöitä. Kappaleessa 6 on esitetty tuloksia materiaalien sitkeysominaisuuksista suoritetuista tutkimuksista -60 °C:n lämpötilassa. Lopuksi esitellään muutamia käytännön sovelluksia, joita on jo otettu käyttöön arktisilla alueilla.

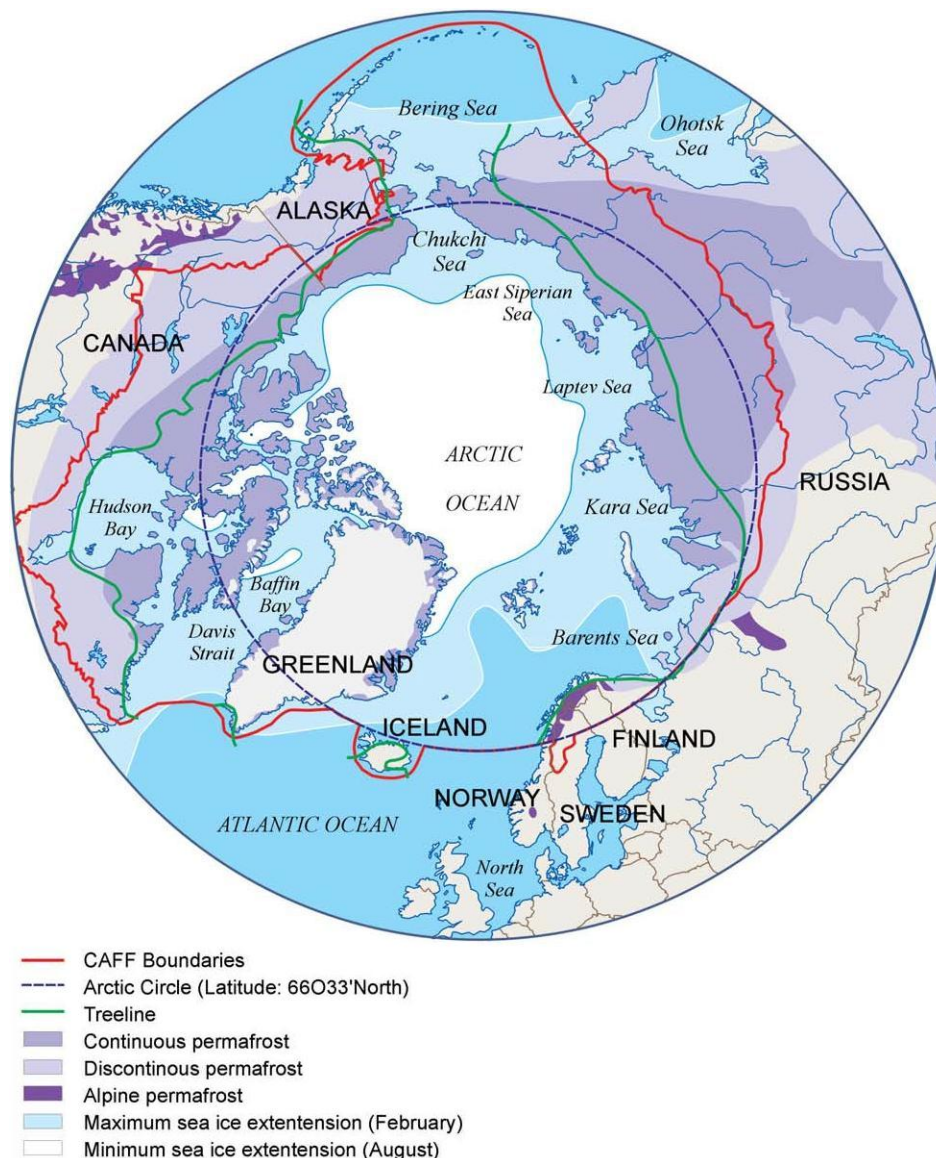
## 2 ARKTISET ALUEET

Arktinen alue voidaan määritellä usealla tavalla eikä sille ole yhtä virallista määritelmää. Yksinkertainen määritelmä on pohjoinen napapiiri (66° 33'N), joka on samalla keskiyön aurinгон ja kaamoksen raja. Muita määrittelykriteerejä ovat lämpötila, metsänraja, ikirouta, merijää ja poliittiset sopimukset. Seuraavassa on listattu yleisesti käytettyjä arktisen alueen rajoja (Lausala & Jumppanen 2002, s. 9):

- pohjoinen napapiiri
- metsänraja
- jatkuvan ikiroudan raja

- merijään keskimääräinen maksimiulottuma
- lämpimimmän kuukauden keskilämpötilan isotermi (10 °C)
- pitkäikäisen lumen tai roudan esiintymisalue
- CAFF-raja (Conservation of Arctic Flora and Fauna).

Erilaisia arktisen alueen rajauksia on esitetty kuvassa 1. Teknologisesta näkökulmasta merijään, lumen ja roudan esiintymisalueet ovat merkittäviä. Näillä alueilla lämpötilat ovat myös yleensä alhaisia. CAFF-raja on arktisen kasvillisuuden ja eläimistön suojeluohjelman mukainen raja. Näiden määritelmien lisäksi eri valtioilla voi olla omia poliittisia rajauksia arktisista ja pohjoisista alueistaan. (Lausala & Jumppanen 2002, s. 9)



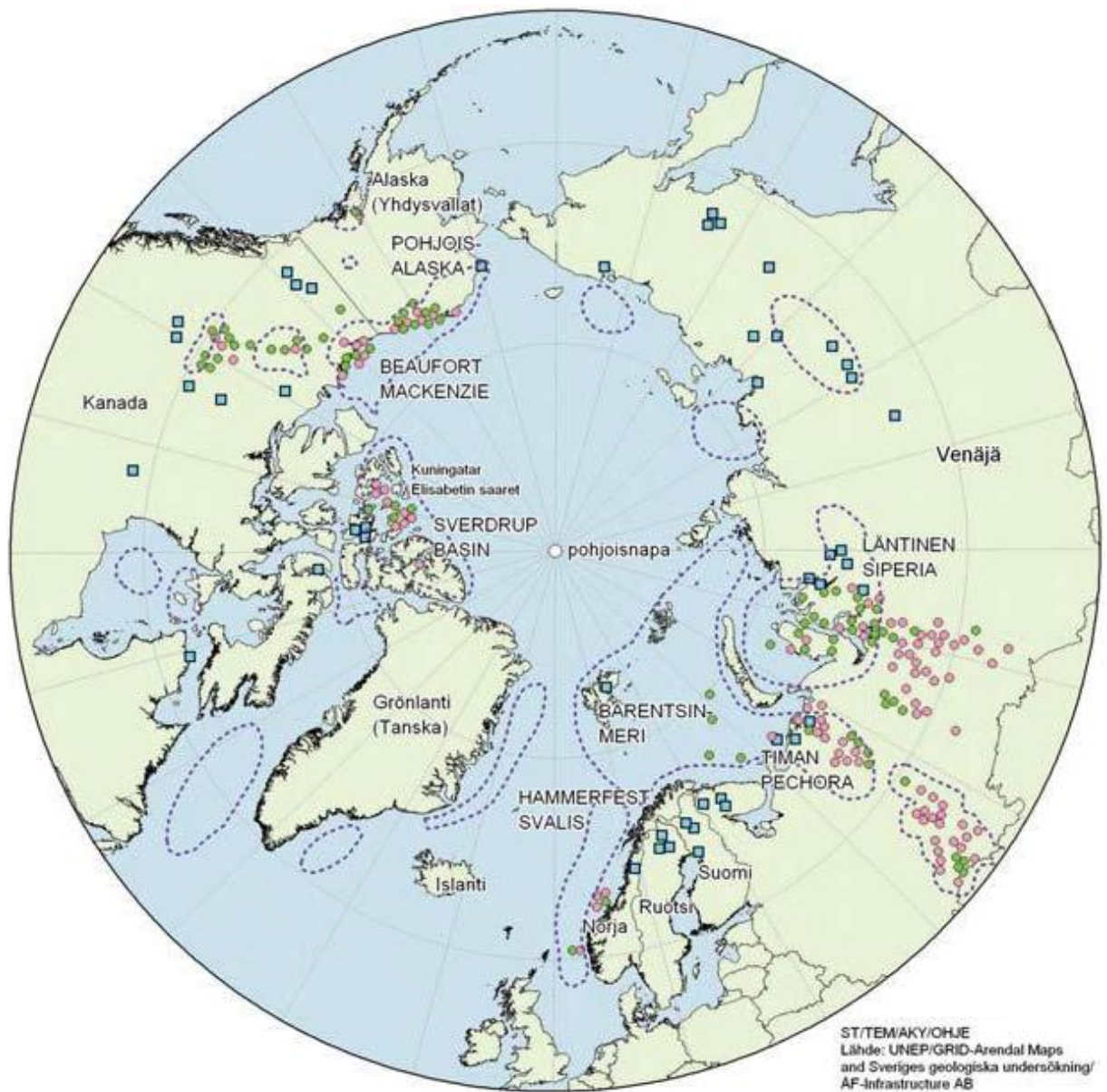
Kuva 1. Arktisen alueen rajauksia eri näkökulmista (Lausala & Jumppanen 2002, s. 43)

## 2.1 Sovelluskohteet

Luonnonvarojen hyödyntäminen on suurin arktisten alueiden kehityskohde. Arktisilla alueilla, kuten Alaskassa ja Venäjällä, on suuret öljy- ja maakaasuvarannot, jotka riittävät vuosikymmeniksi. Arvioiden mukaan 5–13 % käyttöönottamattomista öljyvaroista ja 20–30 % kaasuvaroista sijaitsee arktisilla alueilla. Suurimmat tunnetut esiintymät ovat Jamalin niemimaalla Siperiassa sekä Shtokmanin ja Fedinskin esiintymät Barentsinmerellä (kuva 2). Merellä sijaitsevien hiilivetyesiintymien hyödyntämistä helpottaa ilmaston lämpenemisestä johtuva pohjoisen merijään heikkeneminen. Öljyn ja maakaasun lisäksi myös kaivosteollisuuden tuotteet, kuten malmit ja teollisuusmineraalit, sekä puuvarat ovat merkittäviä luonnonvaroja. Yleensä luonnonvarojen hyödyntäminen edellyttää kuitenkin infrastruktuurin ja paikallisten yhdyskuntien kehittämistä. Käytännössä usein joudutaan rakentamaan teitä, rautateitä ja putkilinjoja sekä kehittämään merikuljetuksia, informaatiopalveluja ja energia- sekä vesihuoltoa. Esiintymien läheisyyteen saattaa syntyä kokonaisia kyliä tai kaupunkeja. Viime vuosikymmeninä on arktisen ympäristön ja alkuperäiskansojen säilyttäminen noussut myös tärkeäksi näkökohdaksi taloudellisissa hankkeissa. (Valtioneuvoston kanslia 2010, s. 19–20; Lausala & Jumppanen 2002, s. 3)

Suurimmat sovelluskohteet arktisilla alueilla ovat laivanrakennus ja offshore-teollisuudessa esimerkiksi öljy- ja kaasulautat, alukset sekä infrastruktuuri, kuten tiet, rautatiet, satamat, telakat, väylät ja palvelut. Myös ympäristö-, turvallisuus-, energia- ja tiedonsiirtoaloilla on merkittäviä liiketoimintamahdollisuuksia. Merijään heikkenemisestä johtuva uusien merireittien hyödyntäminen puolestaan tarjoaa kasvumahdollisuuksia kuljetus- ja logistiikka-alan yrityksille. (Valtioneuvoston kanslia 2010, s. 20–21)

Ilmasto-olosuhteiden muuttuessa pohjoisista merireiteistä tulee potentiaalisia väyliä rahtiliikenteelle. Koillisväylän avautuminen tarjoaa uuden laivayhteyden Atlantin ja Tyynen valtameren välille, mikä lyhentää kuljetusmatkoja Aasian ja Euroopan välillä noin kolmanneksella. Nykyään Koillisväylä on purjehduskelpoinen noin kaksi kuukautta vuodessa. Myös Pohjois-Amerikan pohjoispuolelta kulkeva Luoteisväylä on viime vuosina herättänyt kiinnostusta. Merijään oheneminen saattaa lisäksi mahdollistaa merikuljetukset Pohjoisnavan ylitse jäänmurtajien avustuksella lähivuosikymmeninä. Kuvassa 3 on esitetty mahdollisia käyttöönotettavia merireittejä pohjoisella pallonpuoliskolla. (Valtioneuvoston kanslia 2010, s. 26)



Kuva 2. Mahdollisia tunnettuja öljy- ja kaasuesiintymiä sekä kaivoksia arktisella alueella (Valtioneuvoston kanslia 2010, s. 69)



Kuva 3. Pohjoisia merireittejä (Valtioneuvoston kanslia 2010, s. 71)

## 2.2 Teräsrakentaminen

Suunniteltaessa teräsrakenteita arktisiin olosuhteisiin on otettava useita ankarista olosuhteista johtuvia seikkoja huomioon. Lämpötila voi vaihdella vuoden ja jopa vuorokauden aikana voimakkaasti. Lisäksi rakenteiden tulee kestää auringonsäteilyn aiheuttama pintalämpötilojen nousu sekä ultraviolettisäteilyn vaikutus. Myös auringossa ja varjossa olevien rakenteiden välille saattaa syntyä varteenotettava lämpötilaero. Suuret lämpötilan vaihtelut asettavat korkeita vaatimuksia, erityisesti liitoksille. Auringon vaikutuksia voidaan lieventää käyttämällä pintamateriaaleissa vaaleita värejä. Erittäin alhaiset lämpötilat lisäävät myös rakenteiden lämpöeristysvaatimuksia. Lisäksi arktisen alueen rakenteiden suunnittelussa tulee ottaa

huomioon mahdolliset lumi- ja jääkuormat sekä etenkin offshore-rakenteiden tapauksessa merivesikorrosio. (Paasivuori 1991, s. 24)

Arktisille alueille on ominaista kuljetusreittien ja infrastruktuurin puuttuminen laajoilta alueilta. Tämä pätee erityisesti alueille, joilla rakennetaan ensikertaa. Laajamittaisella esivalmistuksella ja moduulirakenteilla pystytään vähentämään korkeita asennus- ja kuljetuskustannuksia arktisissa oloissa. Matala lämpötila asettaa hitsaukselle erityisvaatimuksia esimerkiksi esikuumennuksen tarpeen ja vetyhaurauden mahdollisuuden osalta. Mahdollisuus käyttää vaihtoehtoisia liitosmenetelmiä, esimerkiksi pulttiliitoksia, tulisi selvittää ja osien asennus tulisi suunnitella mahdollisimman yksinkertaiseksi. Jos kohde sijaitsee rannikolla, on rakentaminen mahdollista suorittaa telakalla ja hoitaa kuljetus kokonaisuudessaan meriteitse. Kuljetukset arktisilla alueilla sekä tarvittavien palvelujen ja ammattitaitoisen työvoiman saanti asettavat suunnittelulle erityisvaatimuksia. (Paasivuori 1991, s. 23, 26–29)

### 3 LUJAT HITSATTAVAT TERÄKSET

Seostamattomat rakenneteräokset kuumavalssatussa toimitustilassa eivät sitkeysominaisuksiensa puolesta sovellu käyttökohteisiin, joissa lämpötila on koko ajan alle  $-40\text{ °C}$  ja rakenne on joko hitsattu tai iskumaisesti kuormitettu. Standardin SFS-EN 10025-2 mukaisille teräksille taataan iskusitkeyden arvoja minimissään  $-20\text{ °C}$ :n lämpötilassa. Matalissa käyttölämpötiloissa joudutaan tästä johtuen käyttämään lujempia ja sitkeämpiä teräksiä. Lujien terästen raja on hieman epäselvä ja niiden myötölujuusalue määritellään eri yhteyksissä eri tavoin. Pääsääntöisesti lujiksi teräksiksi voidaan määritellä teräokset, jotka ovat lujempia kuin yleiset seostamattomat rakenneteräokset ( $R_e > 355\text{ MPa}$ ). Lujat hitsattavat teräokset ovat matalahiiliisiä, niukkaseosteisia ja mikroseostettuja teräksiä, joita voidaan hitsata kaikilla tavallisilla hitsausmenetelmillä. Mikroseostuksen ja kontrolloidun valmistusprosessin ansiosta niillä on seostamattomia rakenneteräksiä paremmat lujuus- ja sitkeysominaisuudet sekä hyvä hitsattavuus ja muovattavuus. Lujat hitsattavat teräokset sijoittuvat lujuusarvoiltaan seostamattomien hiili- ja hiilimanganiteräosten ( $R_e \leq 355\text{ MPa}$ ) sekä nuorutusteräosten ( $R_e \geq 700\text{ MPa}$ ) väliin, osittain myös nuorutusteräosten alueelle. Tässä työssä käsitellään lujia hitsattavia teräksiä myötölujuuteen  $700\text{ MPa}$  saakka. Myötölujuudeltaan yli  $700\text{ MPa}$ :n teräokset määritellään ultralujiksi teräksiksi. Lujat hitsattavat teräokset määritellään standardissa SFS-EN 10025-1 hitsattaviksi hienoraeteräksiksi. Englanniksi niistä käytetään nimitystä HSLA (high-strength low-alloy) steel, microalloyed steel tai vain high-strength steel. Standardeissa SFS-EN 10025-2...6 määriteltyjen teräosten lisäksi matalissa lämpötiloissa yleisesti käytettäviä lujia hienoraeteräksiä ovat eri luokitusseurojen laivanrakennusteräokset, painelaiteteräokset sekä putkiteräokset. (MET 2001, s. 15, 68–69; Härkönen & Tervola 1993, s. 83–84)

Lujat hitsattavat teräkset voidaan jakaa ryhmiin esimerkiksi lujuuden, koostumuksen, valmistusmenetelmän ja mikrorakenteen mukaan. Valmistusmenetelmän mukaan lujat hitsattavat rakenneteräkset ryhmitellään kirjallisuudessa seuraavasti: (MET 2001, s. 71)

- normalisoidut mikroseosteiset hienoraeteräkset
- kontrolloidusti tai termomekaanisesti valssatut mikroseosteiset hienoraeteräkset
- nuorrutetut mikro- ja niukkaseosteiset teräkset.

Normalisoidut ja normalisointivalssatut (N) hitsattavat hienoraeteräkset ja termomekaanisesti valssatut (M) hitsattavat hienoraeteräkset on määritelty standardeissa SFS-EN 10025-3 ja SFS-EN 10025-4 vastaavasti. Nuorrutetut (QT) lujat rakenneteräslevyt puolestaan on määritelty standardissa SFS-EN 10025-6. Normalisoidut ja termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset toimitetaan standardien mukaan kahdessa laatuluokassa. Laatuluokkien N ja M terästen iskukokeiden vähimmäisarvot määritellään alimmillaan lämpötilassa -20 °C ja laatuluokkien NL ja ML terästen alimmillaan lämpötilassa -50 °C. Nuorrutusteräksiä toimitetaan standardin mukaan puolestaan kolmessa laatuluokassa, joista erittäin mataliin lämpötiloihin soveltuvan L1-luokan teräksille määritellään lujuusluokkaan 890 MPa asti 30 J:n vähimmäisiskuenergia lämpötilassa -60 °C. (SFS-EN 10025-3 2004, s. 12; SFS-EN 10025-4 2005, s. 12; SFS-EN 10025-6 2009, s. 10)

Mikrorakenteeseen perustuva ryhmittely on myös käytännöllinen terästen ominaisuuksien riippuessa siitä voimakkaasti. Mikrorakenteen perusteella teräkset voidaan luokitella seuraavasti: (MET 2001, s. 71)

- ferriittis-perliittiset (ferriittis-bainiittiset, bainiittiset) teräkset
- martensiittiset teräkset
- muut, kuten asikulaariset, bainiittiset, niukkaperliittiset ja perliittittömät teräkset.

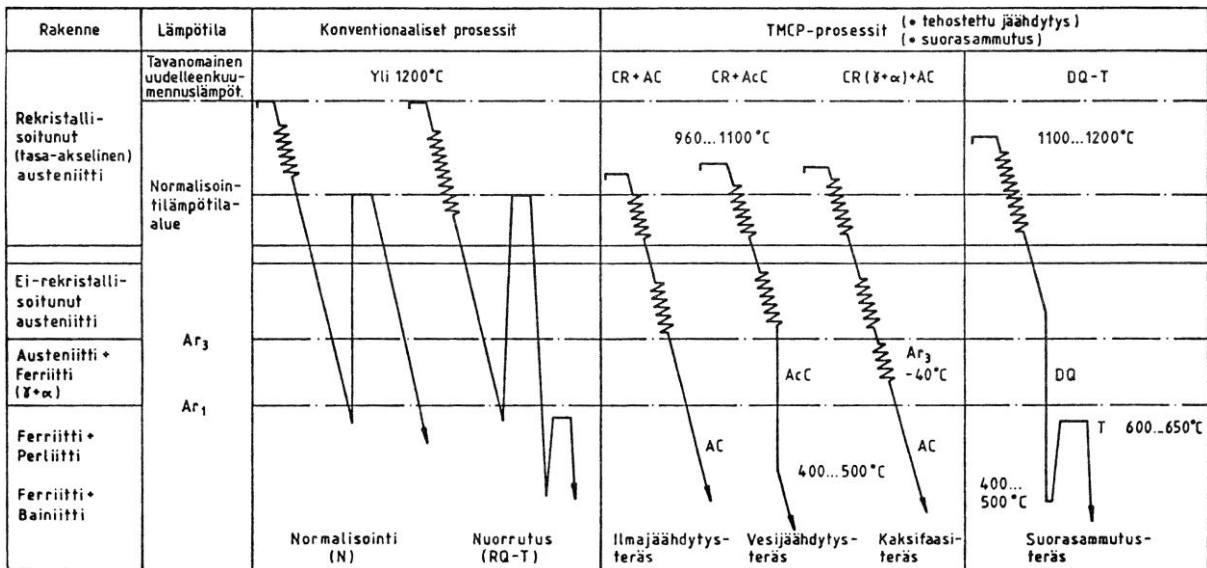
Ferriittis-perliittisten lujien terästen mekaaniset ominaisuudet perustuvat mikroseostukseen ja termomekaaniseen käsittelyyn. Martensiittisillä teräksillä lujuus saadaan aikaan karkenevuutta lisäävillä seosaineilla sekä paremmat sitkeys- ja hitsattavuusominaisuudet mikroseostuksella. Mikroseosaineiden vaikutus perustuu terästä lujittaviin ja rakeenkasvua estäviin erkaumiin. Mikroseosaineita seostamalla saadaan S355 hiilimanganiteräksen myötölujuus nostettua alueelle 410...600 MPa. Mikroseosaineina käytetään esimerkiksi alumiinia, vanadiinia, niobia ja titaania ja niiden pitoisuudet ovat yleensä alle 0,1 %. Mikroseostuksen ansiosta voidaan teräksen hiilipitoisuutta laskea, jolloin sen hitsattavuus ja sitkeys paranevat. (MET 2001, s. 68–69)



Normalisoitujen ja nuorrutettujen terästen lujuusominaisuudet perustuvat tavanomaisiin lämpökäsittelyihin. Yleisten seosaineiden (C, Mn, Cr, Ni, Mo, Cu) avulla lisätään lujuutta ja karkeavuutta ja mikroseostuksella sekä normalisoinnilla saadaan aikaan hienorakeinen mikro-rakenne. Normalisoitujen terästen lujuus on 355...500 MPa. Niiden hiilipitoisuus on välillä 0,1...0,2 % ja seostuksesta johtuen myös hiiliäkvivalentti voi olla suhteellisen korkea. Näin ollen etenkin paksujen kappaleiden kanssa voidaan joutua käyttämään esikuumennusta tai korotettua työlämpötilaa. Lisäksi muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen sitkeys laskee korkeilla lämmöntuonneilla, erityisesti matalissa käyttölämpötiloissa. (Härkönen & Tervola 1993, s. 10; Nevasmaa et al. 1987, s. 11)

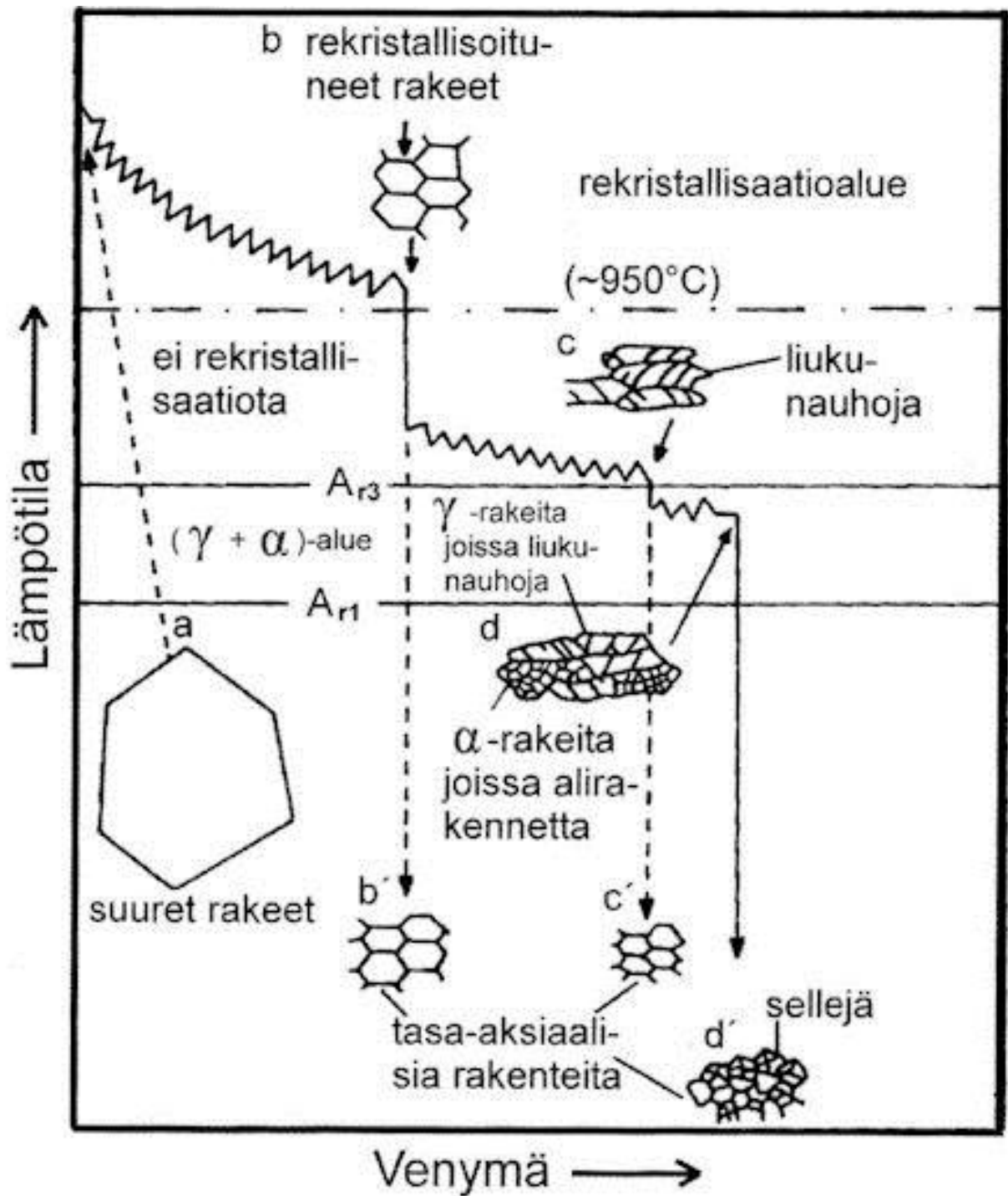
### **3.1 Termomekaanisesti valssatut teräkset**

Lujien terästen hitsausongelmien ratkaisemiseksi kehitettiin Japanissa 1980-luvun alussa termomekaaninen valssausmenetelmä eli TMCP (Thermo-Mechanical Control Process). Termomekaanisesti valssattujen terästen eli M-terästen mekaaniset ominaisuudet saavutetaan kehittyneen valmistusprosessin avulla ilman seosainepitoisuuksien kasvattamista. Näin ollen hiilipitoisuus voi olla alhaisempi, mikä puolestaan takaa paremman hitsattavuuden. Termomekaaninen valssausprosessi käsittää sekä kontrolloidun valssauksen että sen jälkeisen kontrolloidun/tehostetun jäähdytyksen. Siinä kontrolloidaan valssausvaiheiden aikaista lämpötilaa ja muokkausastetta sekä valssauksen jälkeisen jäähdytyksen nopeutta ja aloitus- sekä lopetuslämpötiloja. Termomekaanisella valssauksella saavutetaan erittäin pieni raekoko, mikä tarkoittaa korkeaa lujuutta ja sitkeyttä. Tehostettu jäähdytys (ACC = accelerated cooling) yhdessä mikroseosaineiden kanssa aiheuttaa transformaatio- ja dislokaatiolujittumista, mikä lisää edelleen teräksen lujuutta. Näihin ilmiöihin perustuu matalamman seosaine- ja hiilipitoisuuden tarve, mikä parantaa hitsattavuutta. M-terästen hiilipitoisuus ja näin ollen hiiliäkvivalentti on hieman normalisoituja hienoraeteräksiä alhaisempi. M-terästen merkittävin etu on juuri niiden korkean lujuuden ja sitkeyden sekä hyvän hitsattavuuden ja muovattavuuden yhdistelmä. Kuvassa 4 on esitetty TMCP-prosesseja verrattuna tavanomaisiin valssausprosesseihin. (Härkönen & Tervola 1993, s. 10, 12)

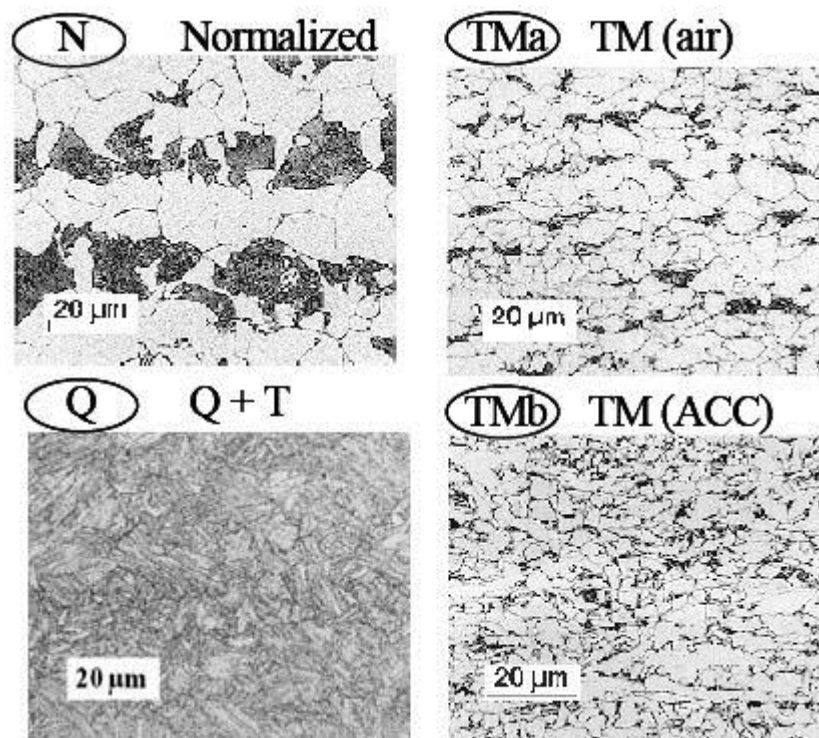


Kuva 4. TMCP-prosessit verrattuna tavanomaiseen normalisointiin ja nuorrutukseen (Nevasmaa et al. 1987, s. 10)

Termomekaanisen käsittelyn tavoitteena on saada teräkseen yhtenäinen, hienorakeinen asikulaarinen ferriittinen tai bainittinen mikrorakenne. Prosessi voi sisältää valssauspistoja kolmella eri lämpötila-alueella kuvan 5 mukaisesti. Lisäksi termomekaanisessa valssauksessa aihion uudelleenkuumennuslämpötila on hieman matalampi kuin tavanomaisessa valssauksessa. Alhaisempi lämpötila yhdessä mikroosainien muodostamien erkaumien kanssa ehkäisee austeniitin rakeenkasvua, mikä johtaisi sitkeyden heikkenemiseen. Esivalssaus austeniitin rekristallisaatioalueella, n. 850...950 °C, hienontaa austeniitin raekokoa. Kun valssaus tapahtuu lämpötilassa 750...850 °C, A<sub>3</sub>-rajan yläpuolella, ei rekristallisaatiota tapahdu ja näin ollen austeniittikiteet kylmämuokkautuvat. Tämä lisää ferriittikiteiden ydintymispaikkoja sekä austeniittikiteiden raerajoilla että niiden sisällä deformaatioauhoissa, mikä puolestaan johtaa hienorakeiseen mikrorakenteeseen. Jos valssaus suoritetaan kaksifaasi-alueella, tapahtuu ferriitissä muokkauslujittumista ja dislokaatiot lisääntyvät. Kuvassa 6 on esitetty teräksen mikrorakenne ja raekoko eri toimitustiloissa. (Nevasmaa et al. 1987, s. 16–19)



Kuva 5. Kontrolloidun valssauksen vaiheita ja syntyviä rakenteita (Kivivuori & Härkönen 2004, s. 199)



Kuva 6. Teräksen mikrorakenne ja raekoko eri toimitustiloissa (Willms 2009, s. 600)

Lujia termomekaanisia teräksiä valmistetaan myötölujuusluokissa 355...700 MPa. Standardi SFS-EN 10025-4 määrittelee kolme lujaa hitsattavaa teräslajia, S355M/ML, S420M/ML ja S460M/ML. Lisäksi useilla valmistajilla on valikoimassaan S500ML teräslaatu. Tunnus M tarkoittaa termomekaanisesti valssattua terästä ja tunnus L matalan käyttölämpötilan teräslaatu. M-luokan terästen iskutheydet testataan lämpötilassa -20 °C ja ML-luokan terästen lämpötilassa -50 °C. Taulukossa 1 on esitetty Ruukin toimittamien termomekaanisesti valssattujen terästen ominaisuuksia. (MET 2001, s. 75)

Taulukko 1. Ruukin toimittamien M-terästen ominaisuuksia levympaksuusluokassa  $\leq 40$  mm. Iskutheys on mitattu pitkittäin valssaussuuntaan nähden (SFS-EN 10025-4 2005, s. 34, 36; Ruukki; Ruukki 2010, s. 8)

Teräsniemi	CE	P <sub>cm</sub>	ReH [Mpa]	Rm [Mpa]	A5 [%]	T [°C]	KV [J]
S355ML	0,39		345	470...630	22	-50	27
S420ML	0,43		400	520...680	19		
S460ML	0,45		440	540...720	17		
S500ML	0,43	0,26	480	570...720	16		
S700ML		0,26	690	770...940	14	-40	30

Termomekaanisesti valssattujen terästen käyttökohteisiin kuuluvat esimerkiksi laivanrakennus, offshore-sovellukset, öljy- ja kaasuputket, kuljetuskaluston kantavat rakenteet sekä siltojen ja rakennusten runkorakenteet. M-teräkset ovat hyvin hitsattavia kaikilla tavallisilla hitsausmenetelmillä eikä korotettua työlämpötilaa yleensä tarvita. Niitä voidaan hitsata myös laajalla lämmöntuontialueella. Lisäksi M-teräkset eivät ole yhtä alttiita vetyhalkeilulle, haurasmurtumille tai lamellirepeilylle kuin seostamattomat rakenneteräkset. Termomekaanisesti valssattujen terästen mikrorakenne ei kuitenkaan ole vesijähdytyksestä johtuen yhtä stabiili kuin normalisoitu mikrorakenne, joten niiden lämpökäsittelyssä ei tule ylittää 700 °C:n lämpötilaa. Virheellisellä lämpökäsittelyllä aiheutettua lujuuden laskua ei voida enää korjata muilla lämpökäsittelyillä, kuten karkaisulla. Hitsauksessa lämpötila nousee liitoksen lähellä yli 700 °C:n, mutta näin syntynyt pehmennyt vyöhyke on kuitenkin riittävän kapea ollakseen heikentämättä rakennetta. (MET 2001, s. 75–76)

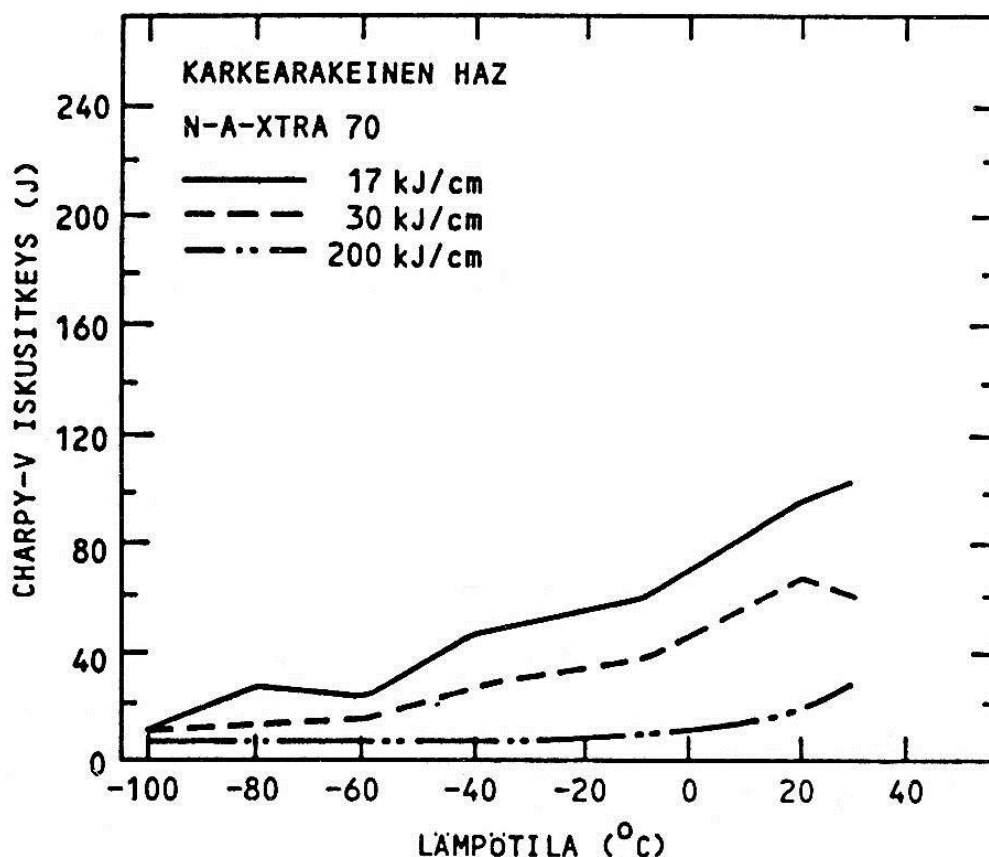
M-terästen hitsauksessa muutosvyöhykkeelle hitsialueen viereen syntyvän pehmenneen vyöhykkeen kovuus on 20...30 HV matalampi kuin viereisillä alueilla. Pehmenneen alueen leveys kasvaa hitsausenergian korotuksen myötä, mutta lämmöntuonnin ollessa sopiva ja näin ollen jäähtymisajan ollessa tarpeeksi lyhyt jää pehmennyt vyöhyke niin kapeaksi, ettei se heikennä rakenteen mekaanisia ominaisuuksia. Käytännössä pehmennyt vyöhyke ei heikennä lujuutta, jos sen leveys on alle puolet levynpaksuudesta. (Härkönen & Tervola 1993, s. 85)

M-teräkset ovat kylmähalkeilun, muutosvyöhykkeen kovuuden, haurasmurtumisen ja lamellirepeilyn puolesta paremmin hitsattavia kuin muut lujat teräkset. M-terästen käytöllä on useita etuja hitsaamisen kannalta, kuten lievemmat lämmöntuontirajoitukset, suurtehoprosessien käyttö sitkeyttä heikentämättä, hitsausliitoksen parempi sitkeys ja vähäisempi tarve korotetulle työlämpötilalle. Toisaalta M-terästen hitsauksessa tulee ottaa huomioon hitsausmuodonmuutokset, muutosvyöhykkeen pehmeneminen sekä lisäaineen seostus. (Härkönen & Tervola 1993, s. 85)

### **3.2 Niukkaseosteiset nuorrutusteräkset**

Hitsattavien mikro- ja niukkaseosteisten nuorrutusterästen myötölujuudet ovat alueella 400...1300 MPa. Matalalla, hiilimanganiteräksiä vastaavalla seostuksella saadaan nuorrutamalla teräksiä, joiden myötölujuus on 490...700 MPa. Nuorrutuksella ja seosaineilla, Al, V, Ti, Nb, Cr, Ni, Mo ja B, voidaan saavuttaa yli 1000 MPa:n myötölujuus. Nuorrutuksella saadaan aikaan luja ja sitkeä päästömartensiittinen mikrorakenne, jonka ansiosta seostus voidaan pitää matalampana ja näin saavuttaa suhteellisen hyvä hitsattavuus. Käytännössä kui-

tenkin lämmöntuonti ja jäähtymisaika on kontrolloitava tarkasti karkenevuustaipumuksen ja halkeamisriskin takia. Korkeammilla lujuuksilla ( $R_e > 500$  MPa) joudutaan kuitenkin ottamaan huomioon lämmöntuontirajoituksia. Etenkin paksummilla kappaleilla korotetun työlämpötilan käyttö on suositeltavaa. Liian matalalla lämmöntuonnilla muutosvyöhykkeen ja hitsiaineen kovuus ja vetyhalkeiluriski kasvavat. Liian korkealla lämmöntuonnilla puolestaan liitoksen sitkeys heikkenee. Kriittisimmät alueet ovat sularaja ja muutosvyöhykkeen karkearakeinen alue. Käytännössä lämmöntuontirajoitukset tiukkenevat teräksen lujuuden kasvaessa ja käyttölämpötilan laskiessa. Kuvassa 7 on esitetty hitsausenergian vaikutus niukkaseosteisen nuorrutusteräksen muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen iskusitkeyteen. Nuorrutusteräkset 900 MPa:n myötölujuuteen saakka soveltuvat erittäin mataliin käyttölämpötiloihin. Standardissa SFS-EN 10025-6 erittäin mataliin lämpötiloihin soveltuvien QL1-luokan terästen iskusitkeys myötölujuusluokkaan 890 MPa asti on 30 J lämpötilassa  $-60$  °C. Terästoimittajat takaavat lisäksi vähintään 27 J:n iskusitkeyksiä 1100...1300 MPa:n teräslaaduilleen. (Härkönen & Tervola 1993, s. 86; Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 126–127)



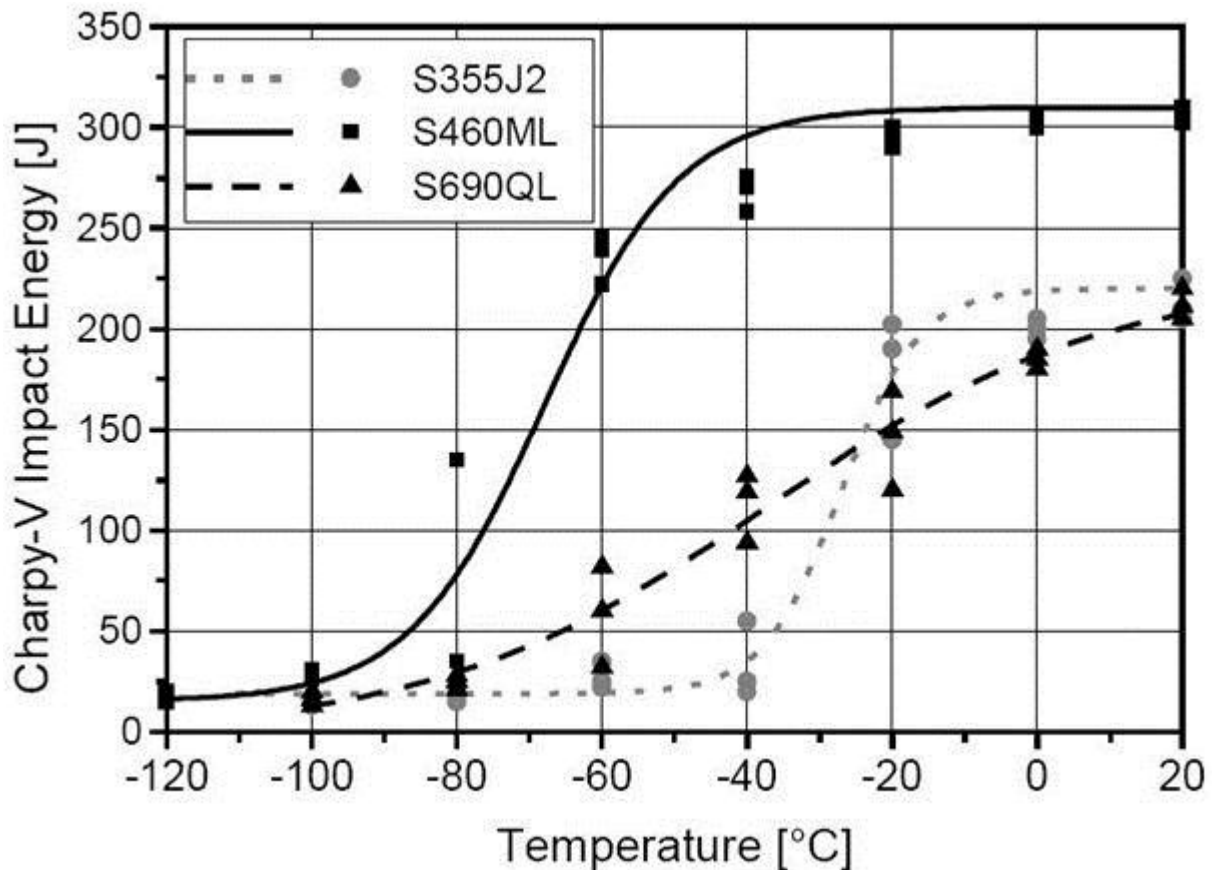
Kuva 7. Hitsausenergian vaikutus niukkaseosteisen nuorrutusteräksen N-A-XTRA 70 (SFS-EN 10025-6 S690QL1) muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen iskusitkeyteen (Härkönen & Tervola 1993, s. 86)

## 4 TERÄSTEN KÄYTTÄYTYMINEN MATALISSA LÄMPÖTILOISSA

Materiaalin sitkeyttä voidaan kuvata sen plastisen käyttäytymisen perusteella. Materiaalin murtuessa esiintyvä prosentuaalinen plastinen venymä eli murtovenymä  $A_5$  tai poikkipinta-alan prosentuaalinen muutos eli murtokourouma  $Z$  ovat eräitä sitkeyden ja muovattavuuden arviointikeinoja. Yleisemmin sitkeys määritellään materiaalin murtumiseen vaadittavan energian avulla. Jännitys-venymä-piirroksessa käyrän alle jäävä pinta-ala kuvaa materiaalin sitkeyttä. Käytännössä materiaalin sitkeyttä kuvataan iskusitkeydellä  $K_V$ , joka kuvaa materiaalin sitkeyttä iskumaisessa kuormituksessa sekä säröjen vaikutusta sitkeyteen. Iskukokeiden avulla saadaan myös käsitys materiaalin transitiokäyttäytymisestä. Sitkeysarvojen vertailussa tulee ottaa huomioon, että testausolosuhteet, kuten lämpötila ja kuormitusnopeus sekä särön ja kappaleen geometria, vaikuttavat huomattavasti tuloksiin. Tästä johtuen tulosten luotettava vertailu voi olla hankalaa. (Black & Kohser 2008, s. 33–35, 44)

### 4.1 Teräksen transitiokäyttäytyminen

Metalleilla, joilla on tilakeskinen kuutiollinen rakenne, murtumiskäyttäytyminen muuttuu tietyllä lämpötila-alueella sitkeästä hauraaksi. Tätä aluetta kutsutaan transitiolämpötila-alueeksi. Kuvassa 8 on esitetty kolmen eri teräksen transitiolämpötilakäyrä. Kuvasta havaitaan hyvin lisäksi lämpökäsittelyn vaikutus transitiokäyttäytymiseen. Transitiokäyttäytyminen on ominaista esimerkiksi ferriittisillä, seostamattomilla ja niukkaseosteisilla teräksillä, joilla transitiolämpötila on välillä usein  $-100...+20$  °C. Tällöin jo tavalliset käyttöolosuhteet saattavat asettaa vaatimuksia materiaalinvalinnalle. Transitiolämpötilan arvo riippuu käytetyistä murtumisparametreista. Usein transiitio tapahtuu lisäksi asteittain jollakin lämpötila-alueella, jolloin tietyn transitiolämpötilan määrittäminen on hankalaa. Yleensä transitiolämpötila määritellään iskusitkeyskokeiden iskuenergiana tai murtopinnan sitkeän murtuman osuutena. Yleisimmin teräksen sitkeyttä kuvataan iskusitkeydellä  $K_V$ , mutta sitä voidaan kuvata myös esimerkiksi murtumissitkeydellä  $K_{IC}$ . Iskusitkeyttä ei voida suoraan verrata murtovenymään tai muovattavuuteen. Esimerkiksi hyvin muovattavalla matalalujuuksisella teräksellä voi olla matala iskusitkeys, kun taas lujalla teräksellä voi olla hyvinkin korkea iskusitkeys, mutta heikko muovattavuus. (Callister & Rethwisch 2011, s. 252–253; Huhdankoski 2000, s. 8)



Kuva 8. Tavallisen rakenneteräksen S355J2, S460ML M-teräksen sekä S690QL nuorrutusteräksen transitiolämpötilakäyriä (Samuelsson & Schröter 2005, s. 106)

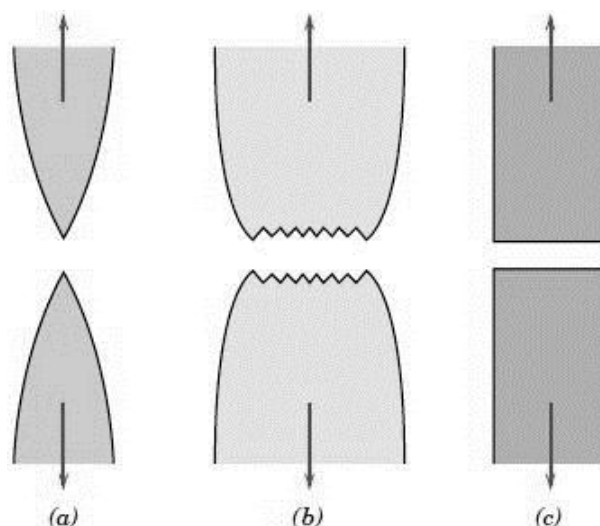
#### 4.2 Teräksen murtuminen

Teräs voi murtua kahdella eri tavalla, sitkeästi tai hauraasti. Murtumistapa määritellään materiaalin plastisen muodonmuutoskyvyn perusteella. Sitkeä murtuma kuluttaa paljon energiaa särön läheisyydessä tapahtuvaan plastiseen muodonmuutokseen, joten se etenee suhteellisen hitaasti ja vaatii edetäkseen kasvavan jännityksen. Näin ollen sen etenemistä pystytään ennakoimaan tarkasti mekaniikan kaavoilla. Plastiset mekanismit murtorajatilassa saattavat lisäksi rajoittaa murtumisen paikalliseksi. Haurasmurtuma vastaavasti kuluttaa vähemmän energiaa, sillä plastisoitumista tapahtuu erittäin vähän. Haurasmurtuma saattaa näin ollen edetä erittäin nopeasti ja ilman kasvavaa jännitystä. Haurasmurtumiseen tarvittava energia voi lisäksi olla varastoituneena materiaalin elastisiin jännityksiin. Särön nopeasta etenemisestä johtuen haurasmurtuma voi tapahtua äkillisesti ja ilman varoittavia merkkejä, mikä tekee siitä erittäin vaarallisen rakenteen turvallisuuden kannalta. (Callister & Rethwisch 2011, s. 236; Huhdankoski 2000, s. 8)



#### 4.2.1 Sitkeä murtuma

Sitkeä murtuma tapahtuu tyypillisesti mikrosäröjen ydintymisen, kasvun ja yhdistymisen seurauksena. Mikrosäröt kasvavat plastisen muodonmuutoksen seurauksena. Materiaalin kuroutuessa sen poikkipinta-ala pienenee, kunnes materiaali murtuu leikkautumalla maksimileikkausjännityksen omaavan tason suunnassa. Yksiaksaalisessa vetojännityksessä materiaali leikkautuu yleensä  $45^\circ$ :n kulmassa, jolloin murtopintoihin syntyy tyypillinen kartiomainen muoto (kuva 9b). Mikrosäröt ydintyvät yleensä sekundäärifaasiin partikkeleihin tai sulkeumiin, joita useimmat materiaaliseokset sisältävät. Näin ollen täysin sitkeä murtuma kuroutumalla (kuva 9a) on harvinainen. Toisaalta joillakin puhtailla metalleilla, kuten kupari, nikkeli ja kulta, esiintyy huomattavaa kuroutumista ja poikkipinta-alan muutosta. (Meyers & Chawla 2009, s. 466, 476)



Kuva 9. Erilaiset murtumatyypit, (a) täysin sitkeä murtuma, (b) tyypillinen sitkeä murtuma ja (c) täysin hauras murtuma (Callister & Rethwisch 2011, s. 237)

#### 4.2.2 Haurasmurtuma

Haurasmurtumassa särö etenee materiaalin läpi ilman merkittävää plastista muodonmuutosta ja kuroutumista (kuva 9c). Särön kärjen läheisyydessä tapahtuu kuitenkin lievää plastisoitumista, joka ydintää mikrosäröjä erkaumiin, sulkeumiin tai raerajoille. Haurasmurtuma voi edetä kahdella eri tavalla, lohkomurtumana tai raerajamurtumana. Lohkomurtuma on yleisempi ja siinä murtuma etenee materiaalissa kiteiden läpi tiettyjä hilatasoja pitkin. Raerajamurtumassa särö etenee raerajoja pitkin. Raerajamurtuma on käytännössä harvinainen ja edellyttää hauraiden faasiin suotautumista raerajoilla. Esimerkiksi rikki ja fosfori voivat haurastuttaa raerajoja. Raerajamurtuma voi tapahtua myös raerajoja herkistävien tai haurastut-

tavien prosessien seurauksena. Raerajamurtuma voi lisäksi edetessään muuttua lohkomurtumaksi. (Huhdankoski 2000, s. 8; Meyers & Chawla 2009, s. 485–485)

Haurasmurtuman syntyminen voidaan jakaa särön ydintymiseen ja sen etenemiseen. Haurasmurtuma ydintyy, jos plastisen muodonmuutoksen dislokaatiomekanismit eivät toimi tarpeeksi pienellä jännityksellä tai tarpeeksi nopeasti. Yleisesti teräsrakenteet suunnitellaan siten, että haurasmurtuman ydintyminen ei normaalissa toiminnassa ole mahdollista. Särö voi silti syntyä esimerkiksi vaurion johdosta. Näin ollen rakenteen varmuus myös haurasmurtuman etenemiseen nähden on tärkeää esimerkiksi kaasuputkissa ja vaarallisten aineiden säiliöissä. (Huhdankoski 2000, s. 8–10)

Haurasmurtuman ydintymistä edesauttavat (Huhdankoski 2000, s. 9):

- korkea vetojännitys
- alhainen lämpötila
- suuri ainepaksuus
- kolmiakselinen jännitystila
- hauras materiaali
- jäännösjännitykset
- iskumainen kuormitus
- jännityskeskittymät
- särömäiset alkuviat.

Kolmiakselinen jännitystila syntyy helposti särön kärkeen, vaikka kappaletta kuormitettaisiin yksiakselisella nimellisjännityksellä. Myös suuri ainepaksuus edesauttaa kolmiakselisen jännitystilan syntymistä. Jäännösjännityksiä esiintyy lämpökäsittelymättömissä hitsatuissa ja polttoleikatuissa rakenteissa. Tällaisille rakenteille asetetaan iskusitkeysluokan suhteen tiukemmat vaatimukset kuin hitsaamattomille tai jälkilämpökäsitellyille kappaleille. (Huhdankoski 2000, s. 9)

Iskusitkeys on erittäin tärkeä ominaisuus materiaalin murtumiskestävyyden kannalta. Iskumainen kuormitus aiheuttaa hetkellisen jännityksen nousun ja korkea kuormitusnopeus lisää haurasmurtuman ydintymisen riskiä. Lisäksi iskumaisen kuormituksen vaikutusta on vaikea ennakoida matemaattisesti. Käytännössä korkeiden kuormitusnopeuksien tapauksissa käytetään sitkeämpiä materiaaleja. Iskusitkeys on yksi materiaalinvalinnan tärkeimpiä kriteerejä. Sitkeämmät materiaalit kestävät vaikeammassa olosuhteissa ja sietävät suurempia jännityskeskittymiä, jolloin niissä voidaan hyväksyä suurempia alkusäröjä. (Huhdankoski 2000, s. 9)

Säröjen kärjessä esiintyy aina jännityskeskittymä. Säröjä voi syntyä esimerkiksi hitsausvirheisiin sekä väsymisen ja korroosion vaikutuksesta. Särön olemassaolon voi todeta rikkomattomilla aineenkoetusmenetelmillä, ja säännöllisillä tarkastuksilla voidaan estää yllättävä rakenteen murtuminen. Jännityskeskittymiä voidaan myös ottaa huomioon käyttämällä tietyille sovelluksille laadittuja suunnitteluohjeita. Taulukossa 2 on esitetty lohkomurtumaan vaikuttavia tekijöitä. (Huhdankoski 2000, s. 9)

Taulukko 2. Lohkomurtumaan vaikuttavia tekijöitä (MET 1981, s. 24)

Tekijä (+ kasvaa)	Murtovenymä	Iskusitkeys	Transitiolämpötila
Raekoko +	-	-	+
Lujuus +	-	-	+
Epäpuhtaudet +	-	-	+
Muokkauslujittuminen +	-	-	+
Lämpötila +	+	+	
Kuormitusnopeus +	-	-	+
3-aks. jännitystila +	-	-	+

Ydintymisen jälkeen särö etenee hauraassa materiaalissa matalalla energialla erittäin nopeasti. Särön eteneminen vaatii kuitenkin riittävän korkeaa kolmiakselista jännitystilaa ja voi pysähtyä sitkeämpään materiaaliin tai jännitysten pienentyessä esimerkiksi ainepaksuuden kasvaessa. Haurasmurtuman etenemisen mahdollistavat eri edellytykset kuin sen ydintymisen. Murtuman edetessä jännitysintensiiteetti kasvaa ja särön kärjen terävyys aiheuttaa kolmiakselisen jännitystilan jo pienillä ainepaksuuksilla. Sitkeillä materiaaleilla haurasmurtuma ei etene, jos plastinen muodonmuutosalue särön kärjessä on tarpeeksi suuri. Tällöin särörintaman ympäristön plastisoituminen kuluttaa enemmän energiaa kuin rakenteen muodonmuutoksesta vapautuu. (Huhdankoski 2000, s. 8, 10)

### 4.3 Haurasmurtuman edellytysten testausmenetelmät

Tavallisten vetokokeiden tuloksista ei voida tarkasti arvioida materiaalien murtumiskäyttäytymistä korkeilla kuormitusnopeuksilla. Iskusitkeystestit kehitettiin, jotta voitaisiin arvioida materiaalien käyttäytymistä vaativimmissa olosuhteissa eli korkeilla kuormitusnopeuksilla, matalissa lämpötiloissa ja kolmiakselisessa jännitystilassa. Iskusitkeyskokeilla voidaan myös selvittää materiaalien transitiolämpötila-alueita. Iskusitkeyttä voidaan testata Charpy- ja Izod-kokeilla, joista Charpy V -koe on yleisimmin käytetty. Teräkset luokitellaan iskusitkeyden

perusteella laatuluokkiin tavallisesti juuri Charpy V -iskukokeiden tulosten perusteella. Taulukossa 3 on esitetty seostamattomien rakenneterästen laatuluokkia. Iskusitkeystestit mittaavat pääasiallisesti haurasmurtuman ydintymisen edellytyksiä. (Callister & Rethwisch 2011, s. 250–251; Huhdankoski 2000, s. 9–10)

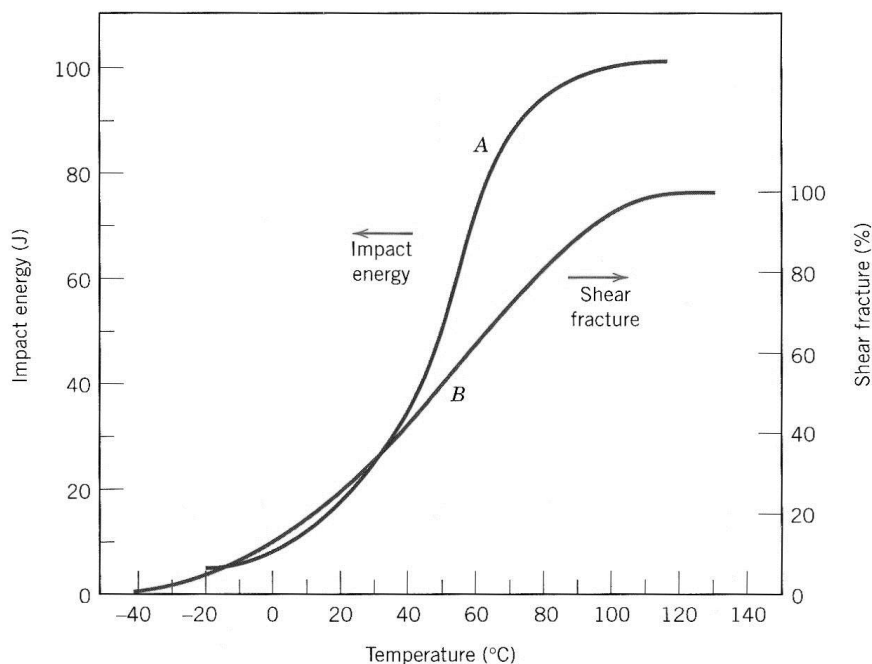
Taulukko 3. Rakenneterästen iskusitkeyden laatuluokkia (SFS-EN 10027-1 2005, s. 10)

Iskuenergia [J]	Koelämpötila [°C]			
	20	0	-20	-40
27	JR	J0	J2	J4
40	KR	K0	K2	K4
60	LR	L0	L2	L4

#### 4.3.1 Charpy-iskukoe

Charpy V -kokeessa murretaan heilurivasaralla  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$  koesauva, jonka keskellä on 2 mm:n syvyinen V-lovi, ja mitataan murtumiseen kulunut energia. Kokeen tulokset ovat lämpötilariippuvaisia ja transitiolämpötilaksi hiiliteräksillä on määritelty täysmittaisen koesauvan murtuminen 27 J energialla. Lujemmilla teräksillä energia voi olla esimerkiksi 40...60 J sovel-luskohteesta riippuen. Kokeen tulokset riippuvat myös materiaalin valssaussuunnasta. Yleensä käytetään pitkittäisiä koesauvoja, joiden energia-absorptio on suurempi. Poikittaisia koesauvoja käytetään esimerkiksi paineastioiden testauksessa ja hitsausliitosten menetel-mäkokeissa. Iskusauvan murtopinta voidaan luokitella sitkeän murtuman osuuden mukaan. Mitä suurempi sitkeän murtuman osuus on, sitä korkeampi on materiaalin iskusitkeys. Ku- vassa 10 on esitetty lämpötilan vaikutus iskusitkeyteen sekä sitkeän murtuman osuuteen hiiliteräksellä A283 ( $C \leq 0,24 \%$ ). (Huhdankoski 2000, s. 10–11)

Standardin SFS-EN ISO 148-1 mukaan iskukoesauvat voivat olla tavallisen  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$ :n lisäksi  $10 \times 7,5 \times 55 \text{ mm}^3$ ,  $10 \times 5 \times 55 \text{ mm}^3$  tai  $10 \times 2,5 \times 55 \text{ mm}^3$ , mutta kaikista luotettavimmat tu- lokset saadaan täysmittaisilla koesauvoilla. Ohuiden kappaleiden iskusitkeys voidaan taata saattamalla niiden mikrorakenne ja koostumus paksumpia hyväksytyjä kappaleita vastaavik- si. Materiaalin transitiokäyttäytyminen riippuu sen koostumuksesta. Sitkeillä materiaaleilla transitiokäyrä on loivempi kuin haurailta. Yleisemmän V:n muotoisen loven sijasta voidaan käyttää myös 5 mm:n syvyistä U:n muotoista lovea. Charpy U -koe antaa hieman matalam- pia transitiolämpötilan arvoja. Charpy U -koetta käytetään erityisesti hauraiden materiaalien testaukseen. Sitä käytetään myös pääsääntöisesti Venäjällä (Layus 2012, s. 115). (Huhdan- koski 2000, s. 11)



Kuva 10. Lämpötilan vaikutus iskusitkeyteen (A) ja sitkeän murtuman osuuteen murtopinnasta (B) hiiliteräksellä A283 (Callister & Rethwisch 2011, s. 253)

#### 4.3.2 Muita testausmenetelmiä

Haurasmurtuman etenemisen edellytyksiä voidaan testata CTOD-kokeella (Crack Tip Opening Displacement), Pellinin pudotusvasarakokeella eli DWT-kokeella (Drop Weight Tear) ja DT-kokeella (Dynamic Tearing). CTOD-kokeita käytetään yleisesti materiaalien sitkeyden ja murtumiskäyttäytymisen arvioimiseen. CTOD-koe suoritetaan kolmipistetaivutus-kokeena, jossa mitataan alkusärön säröpintojen etäisyyttä. DWT-kokeella määritellään teräkselle ns. nollasitkeysämpötila, jossa haurasmurtuma etenee erittäin pienellä nimellisjännityksellä. Sitä käytetään esimerkiksi nesteytettyjen kaasujen kuljetussäiliöiden ja paineenalaisten laitteiden laadunvalvonnassa. Nollasitkeysämpötila määritellään murtopinnan sitkeän murtuman osuuden perusteella. DT-koe on Charpy V -kokeen kaltainen, mutta siinä koesauva ja alkulovi ovat suurempia. Näillä kokeilla saadut tulokset kuvastavat tarkemmin särön etenemiseen vaadittavaa energiaa. (Huhdankoski 2000, s. 12)

#### 4.4 Murtumismekaniikka

1900-luvulla tapahtui useita onnettomuuksia, jotka johtuivat rakenteen murtumisesta särön ja jännityksen yhteisvaikutuksen johdosta. Esimerkiksi lukuisten laivojen ja tankkerien rungot katkesivat säröstä lähtevän murtuman takia. Perinteinen lujuussuunnittelu ei ota huomioon tilanteita, jotka materiaalissa esiintyvä särö voi aiheuttaa. Tällöin ratkaiseva tekijä materiaalin

valinnassa on lujuus, jolloin materiaalit valitaan myötö- ja murtolujuuden perusteella rakenteessa vaikuttavan jännityksen mukaan. Rakenteen turvallisuutta lisää ainoastaan lujuudelle asetettava varmuuskerroin sekä materiaalilta vaadittava murtovenymä. Murtumismekaniikan malli ottaa puolestaan huomioon materiaalissa olevat säröt sekä haurasmurtumisen mahdollisuuden ja ratkaisevana tekijänä on materiaalin murtumissitkeys. Murtumismekaniikan avulla voidaan määrittää jännitysten, materiaaliominaisuuksien ja säröjen sekä niiden etenemismekanismien yhteyksiä toisiinsa. (Anderson 2005, s. 12; Callister & Rethwisch 2011, s. 242)

Murtumismekaniikka voidaan jakaa lineaarisiin ja epälineaarisiin sovelluksiin. Lineaarinen murtumismekaniikka pätee hauraille materiaaleille, joilla ei särön läheisyydessä tapahdu merkittävää plastista muodonmuutosta. Tällöin murtojännitys on suoraan verrannollinen murtumissitkeyteen. Epälineaarista eli elastisplastista murtumismekaniikkaa käytetään sitkeästi käyttäytyvien materiaalien tarkastelussa, jolloin plastiset muodonmuutokset vaikuttavat murtumiseen. Erittäin sitkeillä materiaaleilla määräävinä ovat lujuusominaisuudet. (Anderson 2005, s. 17)

#### 4.4.1 Säröjännitykset

Materiaalien todelliset lujuusarvot ovat huomattavasti alhaisempia kuin niiden atomisidosten pohjalta lasketut teoreettiset arvot. Lujuusarvoja heikentävät materiaalien pinnalliset ja sisäiset mikroskooppiset viat ja säröt. Säröt ovat erittäin haitallisia materiaalin lujuusominaisuuksille, sillä niiden kärkeen syntyy paikallinen jännityskeskittymä eli jännityshuippu. Jännityksen voimistuminen riippuu särön suunnasta, koosta ja muodosta. Jos ohuessa äärettömässä levyssä oletetaan olevan ellipsin muotoinen särö, joka on kohtisuorassa jännitystä vastaan, maksimijännitys  $\sigma_m$  särön kärjessä voidaan laskea kaavalla (Callister & Rethwisch 2011, s. 242, Salmi & Virtanen 2008, s. 319)

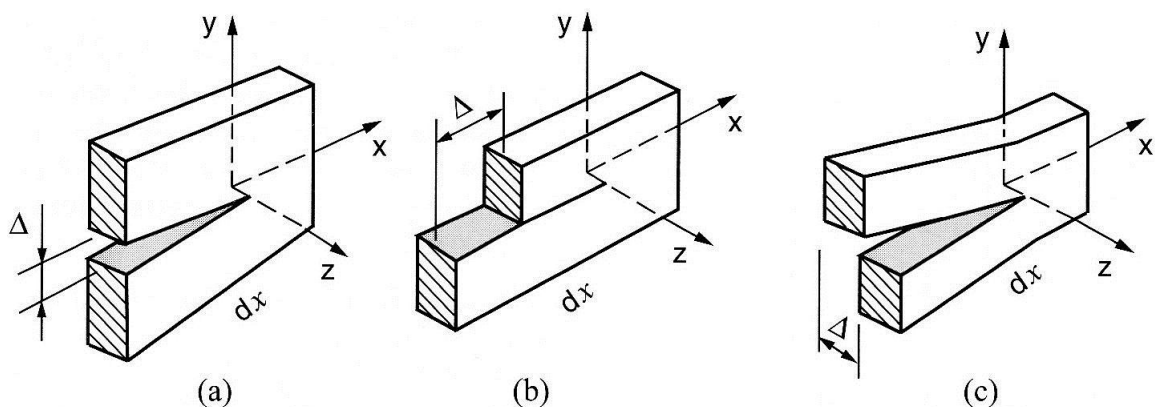
$$\sigma_m = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \quad (1)$$

missä  $\sigma$  on nimellisvetojännitys ja  $a$  ja  $b$  ovat ellipsin iso- ja pikkuakselien puolikkaat. Jos särö on erittäin kapea eli kärjen säde  $\rho \ll a$ , maksimijännitys saadaan kaavan (2) mukaisesti. (Meyers & Chawla 2009, 410)

$$\sigma_m = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2)$$

Pitkillä ja terävillä säröillä maksimijännitys voi nousta erittäin suureksi. Kaavoista (1) ja (2) nähdään että, jos  $2b \rightarrow 0$  tai  $\rho \rightarrow 0$ , niin  $\sigma_m \rightarrow \infty$ . Käytännössä jännityksen noustessa materiaalin myötöraja tulee vastaan, jolloin plastisoituminen särön kärjessä rajoittaa jännityksen äärelliseksi. Maksimijännityksen ja nimellijännityksen suhdetta kutsutaan loven muotoluvuksi  $K_t$ , joka kuvaa särön geometrian vaikutusta jännitykseen. Mikroskooppisten vikojen ja säröjen lisäksi myös makroskooppiset viat, kuten huokokset ja sulkeumat, sekä terävät kulmat ja lovet voivat aiheuttaa jännityshuippuja (Callister & Rethwisch 2011, s. 243; Meyers & Chawla 2009, s. 410; Salmi & Virtanen 2008, s. 319)

Särön kuormitustavat voidaan jakaa vaikuttavan jännityksen suunnan perusteella kolmeen eri kuormitusmuotoon. Kuormitustapa I on merkittävin ja johtuu aksiaalisesta jännityksestä. Kuormitustavat II ja III syntyvät leikkausjännityksen johdosta. Kappaleeseen voi vaikuttaa myös useiden kuormitustapojen yhdistelmä. Tapa I eli avausmuoto (opening mode) syntyy säröpintoja kohtisuoraan olevan vetojännityksen seurauksena. Tapa II eli liukumuoto (sliding mode) aiheuttaa leikkaavaa kuormitusta ja syntyy, kun leikkausjännitys vaikuttaa kohtisuoraan särörintamaa vastaan. Tapa III eli kiertomuoto (twisting/tearing mode) taas syntyy, kun leikkausjännitys vaikuttaa särörintaman suuntaisesti, jolloin syntyy vääntävää kuormitusta. Leikkaavaa kuormitusta esiintyy esimerkiksi kuulalaakereissa ja vääntävää kuormitusta taas akseleissa. Kuvassa 11 on esitetty kaikki kolme kuormitustapaa. (Ikonen & Kantola 1986, s. 20; Meyers & Chawla 2009, s. 423–424)



Kuva 11. Särön eri kuormitustavat: (a) avausmuoto, (b) liukumuoto, (c) kiertomuoto (Salmi & Virtanen 2008, s. 318)

#### 4.4.2 Jännitysintensiiteettikerroin ja murtumissitkeys

Lineaarisen murtumismekaniikan tarkastelut perustuvat särön kärjen jännitystilaa kuvaavaan jännitysintensiiteettikertoimeen  $K$  sekä materiaaleille ominaiseen murtumissitkeyteen  $K_c$ . Käy-

tännössä jännitysintensiiteetikertoimelle käytetään tunnusta  $K_I$ , jossa alaindeksi ilmaisee särön kuormitustavan. Jännitysintensiiteetikerroin ottaa huomioon vaikuttavan jännityksen sekä särön koon ja orientaation kaavan (3) mukaisesti. (Huhdankoski 2000, s. 14)

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

Kaavassa (3)  $Y$  on kerroin, joka huomioi kuormitustavan sekä kappaleen ja särön koon sekä geometrian. Esimerkiksi äärettömässä levyssä, jossa on läpimenevä särö,  $Y = 1$ , ja puoliäärettömässä levyssä, jossa on reunasärö,  $Y = 1,12$ . (Callister & Rethwisch 2011, s. 244–245)

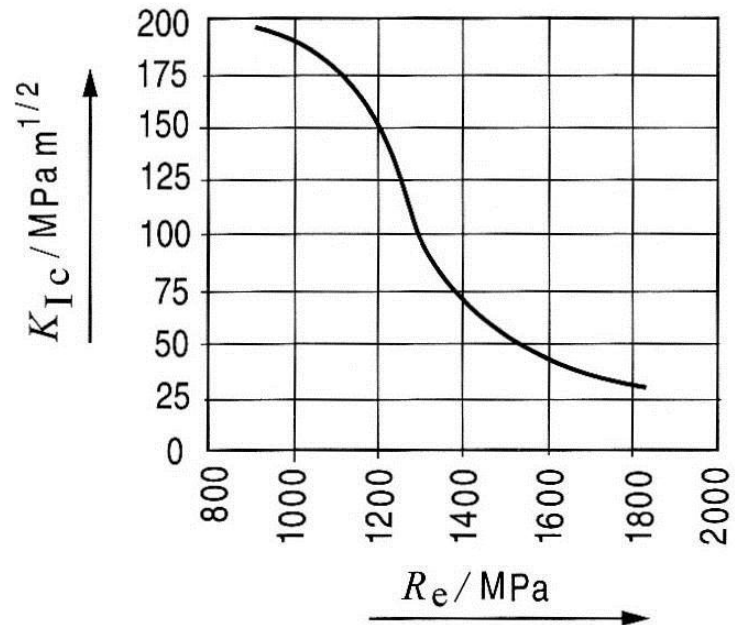
Särö etenee, kun jännitysintensiiteetti saavuttaa materiaalille ominaisen kriittisen arvon, jota kutsutaan murtumissitkeydeksi. Murtumissitkeys kuvaa materiaalin kykyä vastustaa särön etenemistä ja sen yksikkönä on  $\text{MPa m}^{1/2}$ . Murtumissitkeyden avulla voidaan laskea kappaleen kriittinen särön pituus tai särön etenemisen rajajännitys, kun toinen niistä tiedetään. Kun materiaalinpaksuus saavuttaa tietyn arvon, sen vaikutus murtumissitkeyteen vähenee. Paksuilla materiaaleilla vaikutus ei enää muutu, jolloin arvo kuvaa suoraan materiaalin murtumissitkeyttä. Tällöin murtumissitkeydelle käytetään tunnusta  $K_{Ic}$ . (Huhdankoski 2000, s. 14; Meyers & Chawla 2009, s. 410)

Murtumissitkeyttä voidaan testata esimerkiksi taivutussauvalla tai ns. CT-sauvalla (compact tension). Käytännössä kappaletta kuormitetaan kasvavalla voimalla kunnes särö alkaa edetä. Särön etenemisen käynnistävä jännitysintensiiteetti on materiaalin murtumissitkeys. Murtumissitkeyskokeet ovat kuitenkin kalliita ja monimutkaisia toteuttaa, joten käytännössä sitkeyttä arvioidaan iskusitkeyskokeiden perusteella (Callister & Rethwisch 2011, s. 251). Yleisesti käytössä olevien metallien murtumissitkeydet ovat välillä  $20 \dots 200 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Erityisesti teräksillä vaihtelua on huomattavasti. Normaalisti murtumissitkeys on käänteisesti verrannollinen materiaalin vetolujuuteen. Myös lämpötila vaikuttaa huomattavasti murtumissitkeyteen. Kuvassa 12 on esitetty niukkaseosteisen teräksen AISI 4340 murtumissitkeyden riippuvuus myötölujuudesta ja kuvassa 13 eräiden koneterästen murtumissitkeyksiä lämpötilan funktiona. (Huhdankoski 2000, s. 14; Salmi & Virtanen 2008, s. 329–331)

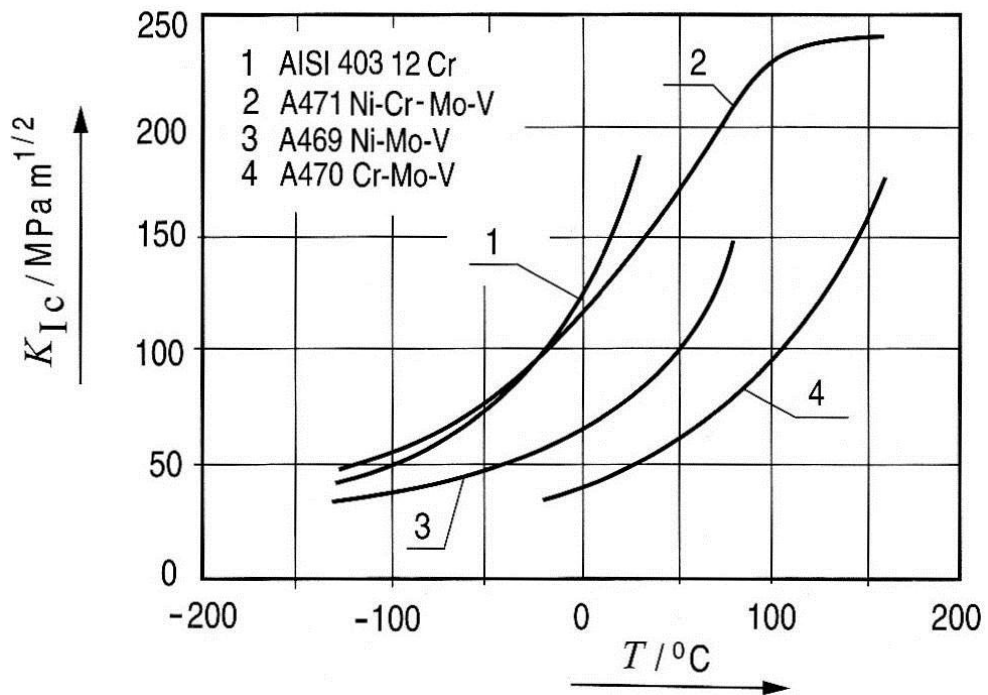
Elastis-plastisessa murtumismekaniikassa murtumisparametrina käytetään J-integraalia. Se kuvaa potentiaalienergian muutoksen avulla tarvittavan energiamäärän särön kasvamiseen. J-integraali ottaa huomioon plastisoitumisen särön kärjessä ja sitä voidaan käyttää suhteellisen ohuillekin kappaleille. Toinen elastis-plastisessa murtumismekaniikassa käytetty arvo on särön kärjen avauma eli CTOD-arvo  $\delta$ . CTOD-arvo mitataan kolmipistetäivutussauvalla sa-



maan tapaan kuin  $K_{Ic}$ . Särön kärjen avauma kuvaa säröpintojen välimatkaa juuri ennen murtuman etenemistä. (Huhdankoski 2000, s. 15)



Kuva 12. Niukkaseosteisen teräksen AISI 4340 murtumissitkeyden vaihtelu myötölujuuden funktiona. Eri lujuusarvot on saatu lämpökäsittelyillä (Salmi & Virtanen 2008, s. 331)

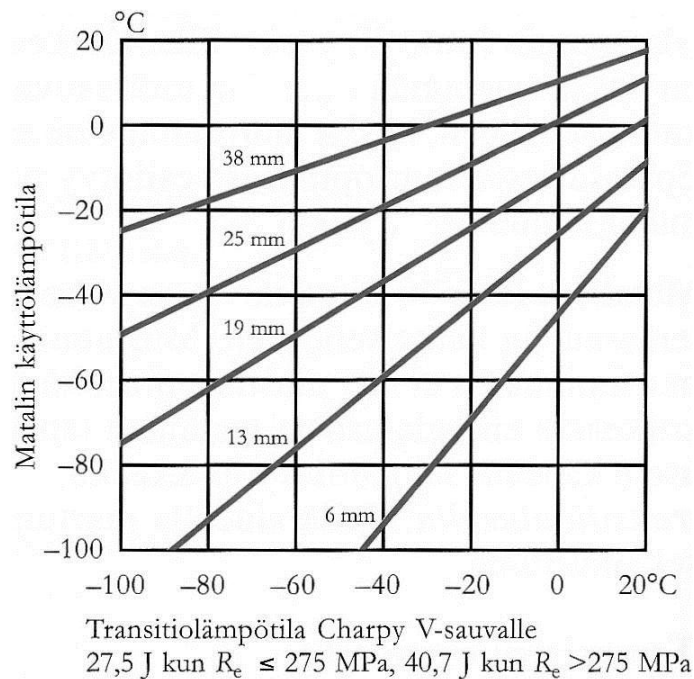


Kuva 13. Koneterästen murtumissitkeyden riippuvuus lämpötilasta (Salmi & Virtanen 2008, s. 331)

#### 4.5 Sitkeyteen vaikuttavat tekijät

Materiaalin sitkeyteen vaikuttavat useat tekijät, kuten seostus, valmistusmenetelmä, mikrorakenne ja lämpökäsittelyt. Myös käyttöolosuhteet asettavat vaatimuksia materiaalin sitkeydelle esimerkiksi lämpötilan, kuormitusnopeuden, lujuusvaatimusten, rakenteen muodon ja jännitys jakauman kautta. On tärkeää tietää rakenteen kuormitustyyppi ja -nopeus teräksen valinnan kannalta. Staattisessa kuormituksessa kestävä teräs voi murtua väsyttävän tai iskumaisen kuormituksen johdosta. Pääsääntöisesti tekijät, jotka kohottavat lujuutta ja kovuutta, heikentävät sitkeyttä. Poikkeuksena on raekoon pienentäminen, joka sekä lujittaa että sitkistää terästä. (Herring 2010, s.14)

Yleisesti ohut materiaali on aina paksumpaa materiaalia sitkeämpää tietyssä transitiolämpötilassa. Kuvassa 14 on esitetty levynpaksuuden vaikutus materiaalin murtumislämpötilaan transitiolämpötilan funktiona. Murtumislämpötilat on saatu suurlevykokeen perusteella ja transitiolämpötilat Charpy V-kokeista. Tulokset pätevät useiden lujuusluokkien hitsatuille rakenteille. Kuvaajan Y-akselin osoittama matalin käyttölämpötila kuvaa lämpötilaa, jossa kapaleet murtuivat hauraasti suurlevykokeen vetokokeissa. Kuvaajasta nähdään selvästi, että ohuemmat levyt ovat varmempia haurasmurtuman suhteen ja ovat sitkeitä vielä transitiolämpötilan alapuolellakin. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 33–34)



Kuva 14. Transitiolämpötilan suhde alimpaan käyttölämpötilaan eri levyypaksuuksilla (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 34)

#### 4.5.1 Tiivistäminen

Teräksen tiivistämisellä tarkoitetaan valmistuksen yhteydessä sulaan liuenneen hapen poistamista. Happi aiheuttaa teräksen jähmettyessä rautaoksidisulkeumia, jotka heikentävät teräksen mekaanisia ominaisuuksia. Tiivistämättömän teräksen raekoko voi myös kasvaa suureksi, jolloin iskusitkeys heikkenee. Tiivistämisessä käytetään yleensä piitä, alumiinia tai molempia yhdessä. Piitä käytetään tiivistämiseen yli 0,1 %, mutta sitä voidaan seostaa 0,5 %:iin saakka lujuuden kasvattamiseksi. Alumiinia tarvitaan tiivistämiseen huomattavasti vähemmän, noin 0,02 %. Lisäksi alumiini sitoo teräksessä paitsi happea, myös typpeä, mikä on edullista teräksen sitkeyden kannalta kahdella tavalla. Alumiininitridit hidastavat rakeenkasvua valssauslämpötilassa ja vapaan typen sitominen vähentää teräksen myötövanhenemistä. Käytännössä hitsattavissa rakenteissa käytettävät teräkset ovat aina tiivistettyjä riittävän sitkeyden ja vanhenemisenkeston varmistamiseksi. (Huhdankoski 2000, s. 18)

#### 4.5.2 Raekoon vaikutus

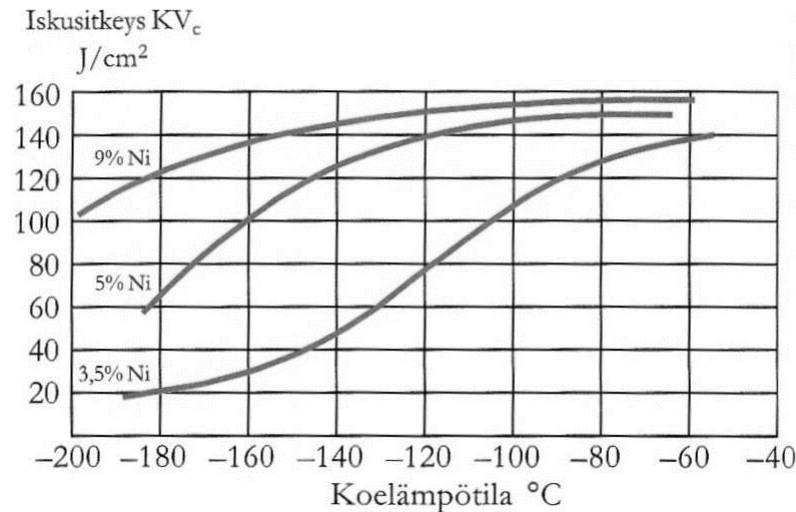
Pieni raekoko parantaa terästen iskusitkeyttä sekä nostaa sen lujuutta. Hienoraeteräksissä käytetään mikroseosaineina esimerkiksi niobia ja titaania, jotka auttavat hidastamaan austeniitin rakeenkasvua valssauksen ja normalisoinnin yhteydessä. Pienen raekoon saavuttamiseksi vaaditaan lisäksi normalisointi. Tämä voidaan toteuttaa myös normalisointivalssauksena tai termomekaanisena käsittelynä valmistuksen yhteydessä. (Huhdankoski 2000, s. 18)

#### 4.5.3 Seosaineiden vaikutus

Seosaineista teräksen iskusitkeyttä lisäävät pääasiassa mangaani ja nikkeli. Mangaania käytetään yleisesti kaikissa teräksissä hapen poistamiseen sekä rikin sitomiseen MnS-yhdisteiksi. Ilman mangaania rikki muodostaisi matalassa lämpötilassa sulavia rautasulfideja, jotka haurastuttavat raerajoja. Mangaani-hiili-suhde on erityisen tärkeä teräksen iskusitkeyden kannalta. Mangaaniseostuksella saadaan teräksen transitiolämpötila laskettua -20 °C:een vielä suhteellisen korkealla hiilipitoisuudella. Yli 1,6...1,7 %:n mangaaniseostus huonontaa kuitenkin teräksen hitsattavuutta sekä muuttaa mikrorakennetta bainiittiseksi, jolloin transitiolämpötila puolestaan nousee. (Huhdankoski 2000, s. 18; Koivisto et al. 2010, s. 132)

Nikkeli alentaa voimakkaasti teräksen transitiolämpötilaa. Puolen prosentin nikkelseostuksella ja mikroseostuksella voidaan teräksen transitiolämpötila laskea -80 °C:een. Usean prosentin nikkelseostuksella teräs saadaan erittäin sitkeäksi jopa alle -200 °C:n lämpötiloissa (kuva 15). Nikkeli on kuitenkin kallis seosaine eikä sitä käytetä kuin erittäin vaativien olosuhteiden

teräksissä. Nikkeliseosteisia teräksiä käytetään esimerkiksi erittäin matalissa lämpötiloissa säilytettävien nestekaasujen painesäiliöissä. (Huhdankoski 2000, s. 18)



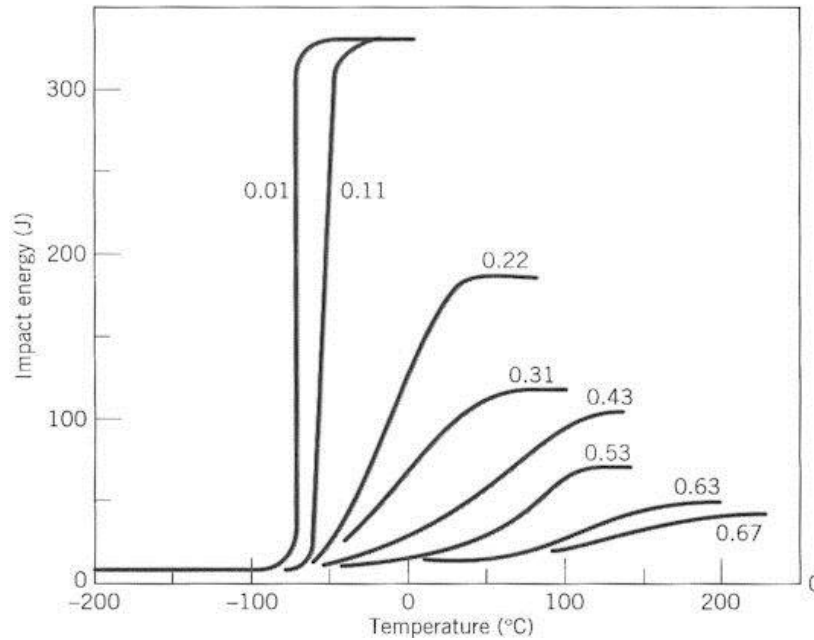
Kuva 15. Nikkelipitoisuuden vaikutus rakenneteräksen iskusitkeyteen (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 150)

Pii ja alumiini parantavat sitkeyttä tiivistysvaikutuksen lisäksi. Niiden vaikutus perustuu osittain niiden muodostamiin nitrideihin. Vanadiinia, titaania ja niobia käytetään hienoraeteräksissä mikroseosaineina. Ne parantavat teräksen sitkeyttä pääasiassa raekoko hienontavan vaikutuksensa kautta. Näiden seosaineiden muodostavat nitridierkaumat ovat erittäin stabiileja ja säilyttävät teräksen hienorakeisena myös hitsauksessa. Nuorrutusterästen sitkeyttä voidaan parantaa booriseostuksella. (Davis 2001, s. 153–156; Koivisto et al. 2010, s. 133)

Iskusitkeyttä heikentävät mm. hiili, rikki ja fosfori. Myös kromilla ja molybdeenillä on sitkeyttä lievästi heikentävä vaikutus. Hiili on olennainen seosaine teräksen lujuuden ja kovuuden kannalta, mutta hiilipitoisuuden nostaminen laskee samalla teräksen iskusitkeyttä ja nostaa transitiolämpötilaa (kuva 16). Matalien käyttölämpötilojen teräksien hiilipitoisuus onkin rajoitettu riittävän iskusitkeyden ja hitsattavuuden takaamiseksi. Matalahiilisille teräksille on tyypillistä myös jyrkkä transitiokäyrä. (Davis 2001, s. 150, 155; Huhdankoski 2000, s. 18)

Rikin vaikutus iskusitkeyteen riippuu teräksen tiivistystavasta. Pii-tiivistetyillä teräksillä rikkipitoisuus ei vaikuta merkittävästi sitkeyteen, mutta pii-alumiini-tiivistetyillä teräksillä rikkipitoisuuden alentaminen voi lisätä sitkeyttä huomattavasti. Rikki vaikuttaa voimakkaammin poikittaisten iskukokeiden arvoihin kuin pitkittäisten. Poikittaisissa iskukokeissa iskuenergia nousee vasta rikkipitoisuuden ollessa alle 0,01 %. Fosfori korottaa voimakkaasti teräksen transitiolämpötilaa sekä laskee iskusitkeyttä. Käytännössä P-pitoisuus tulisi olla alle 0,025 % ja S-

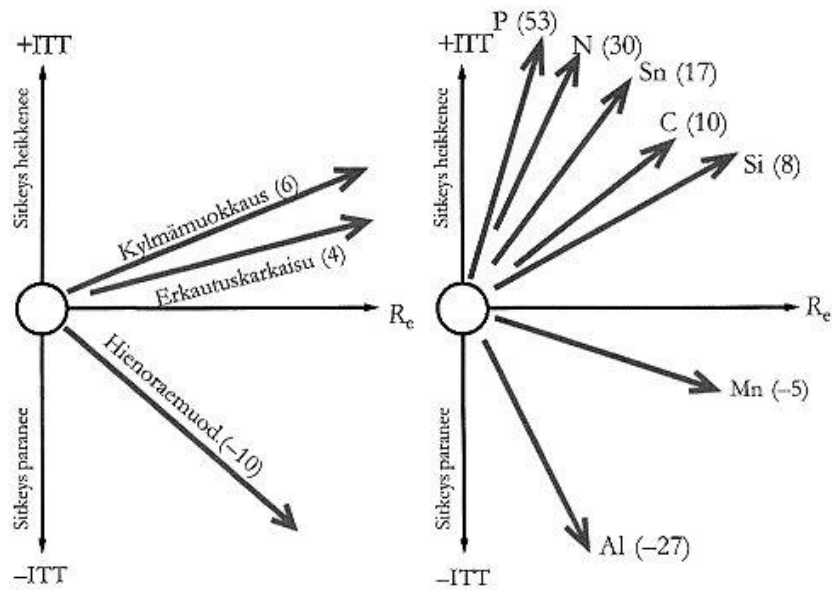
pitoisuus alle 0,020 %. Taulukossa 4 on esitetty eri seosaineiden vaikutuksia teräksen ominaisuuksiin. Kuvassa 17 on seosaineiden sekä erilaisten käsittelyjen vaikutuksia teräksen lujuuteen ja transitiolämpötilaan. (Davis 2001, s. 153; Huhdankoski 2000, s. 18)



Kuva 16. Hiilipitoisuuden vaikutus Charpy V -energiaan ja transitiolämpötilaan (Callister & Rethwisch 2011, s. 254)

Taulukko 4. Seosaineiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin (Lepola & Makkonen 2006, s. 33)

Seosaine	Lujuus	Sitkeys	Hitsattavuus
Hiili	+	-	-
Pii	+	+	+
Mangaani	+	+	+
Fosfori	+	-	-
Rikki	-	-	-
Molybdeeni	+	-	-
Kromi	+	-	-
Nikkeli	+	+	+
Alumiini	+	+	+
Niobi	+	+	+
Vanadiini	+	+	+

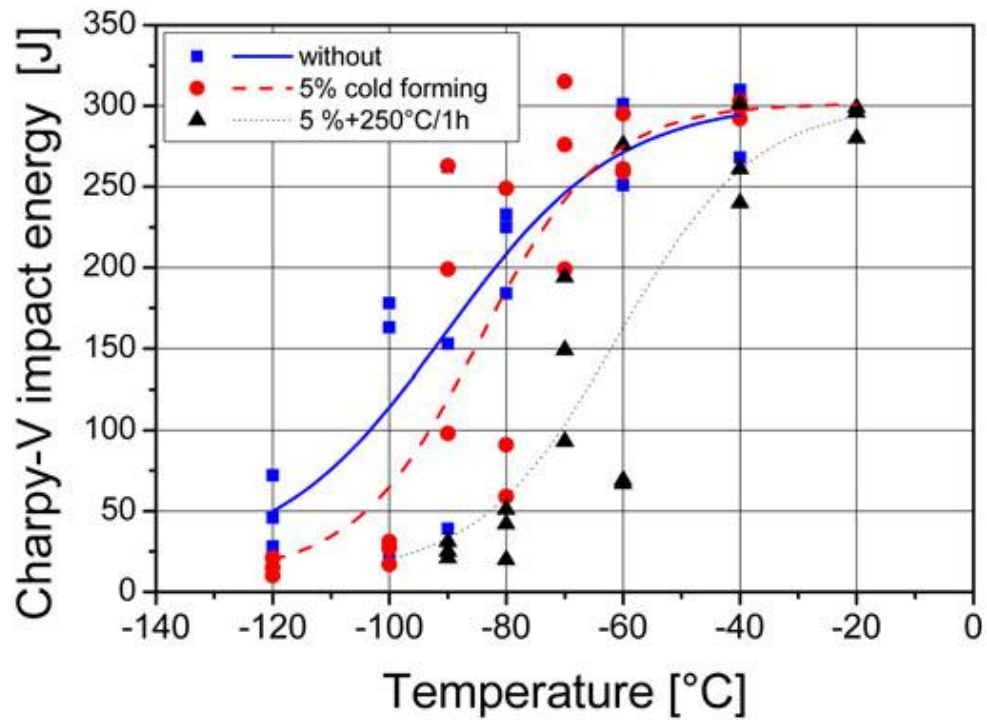


Kuva 17. Eräiden käsittelyjen ja seosaineiden vaikutus teräksen lujuuteen ja transitiolämpötilaan (ITT). Suluissa olevat numerot ilmaisevat kuinka monta astetta transitiolämpötila muuttuu, kun myötölujuus nousee 15 MPa (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 106)

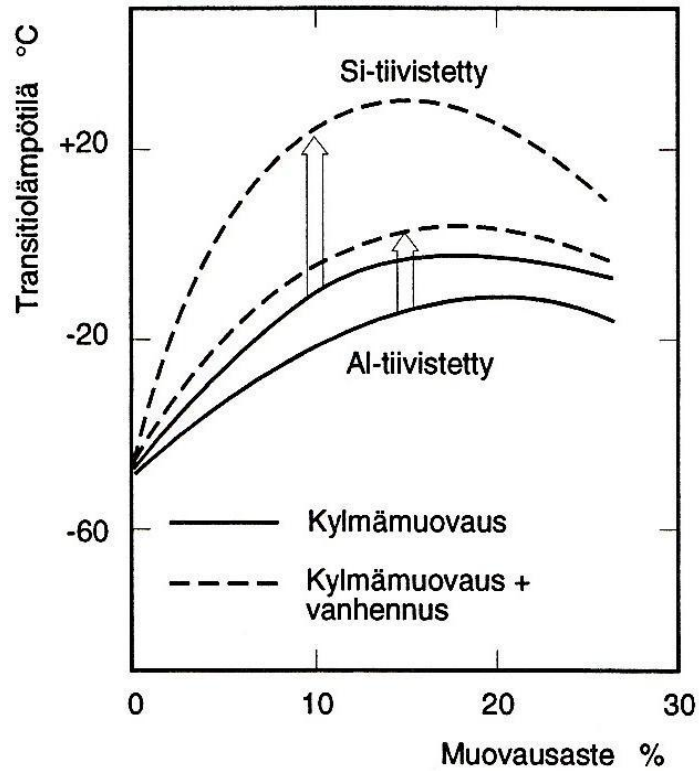
#### 4.5.4 Kylmämuokkaus ja myötövanheneminen

Teräksen vanheneminen tarkoittaa mekaanisten ominaisuuksien muuttumista diffuusion vaikutuksesta. Vanhenemista tapahtuu kylmämuokatuilla teräksillä lämpötilan noustessa vapaiden hiili- ja typpiatomien kerääntyessä dislokaatioiden läheisyyteen. Tällöin teräksen lujuus kasvaa, mutta sitkeys puolestaan heikkenee. Typpi voi aiheuttaa vanhenemista jo huoneenlämpötilassa tai lyhyessä lämmityksessä 100 °C:een. Hiilen aiheuttama vanheneminen vaatii noin 250 °C:n lämpötilan. Vanhenemisenkestävyyttä parantaa teräksen tiivistäminen, erityisesti alumiini- ja titaanitiivistys. Titaanitiivistys estää sekä typen että hiilen aiheuttamaa vanhenemista. (Huhdankoski 2000, s. 18)

Muokkauslujittumisesta johtuva sitkeyden aleneminen riippuu muokkausasteesta ja vanhenemisen kohdalla lämpötilasta ja pitoajasta. Esimerkiksi normalisoidulla pii- ja alumiinitivistetyllä teräksellä 10 %:n muokkausaste nostaa transitiolämpötilaa 20...30 °C ja vanheneminen, tunnin hehkutus 250 °C:ssa, noin 20 °C. Kylmämuokatut rakenteet voivat silti kestää matalissa lämpötiloissa, jos alkuperäinen transitiolämpötila on ollut erittäin matala, rakenteet ovat ohuita tai niitä ei sijoiteta kriittisiin kohtiin. Kuvassa 18 on esitetty kylmämuokkauksen sekä vanhenemisen vaikutus termomekaanisesti valssatun teräksen S500M transitiolämpötilaan ja kuvassa 19 yleisesti vanhenemisen ja eri kylmämuokkausasteiden sekä tiivistystavan vaikutus teräksen transitiolämpötilaan. (Huhdankoski 2000, s. 19)



Kuva 18. M-teräksen S500M vanhenemiskäyttäytyminen (Willms 2009, s. 602)



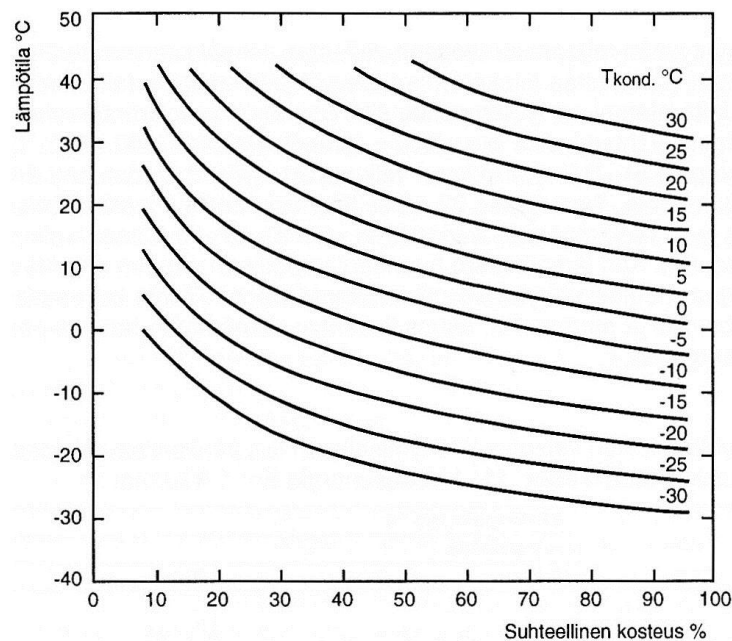
Kuva 19. Kylmämuokkauksen ja vanhennuksen 250 °C:ssa vaikutus teräksen transitiolämpötilaan eri tiivistysaineilla (Huhdankoski 2000, s. 19)

#### 4.5.5 Lämpökäsittelyn vaikutus

Hitsatun rakenteen haurasmurtumiskestävyyttä voidaan parantaa jännitystenpoistohehkutuksella sekä normalisoinnilla. Jäännösjännitysten laukaiseminen saattaa laskea rakenteen sallittua käyttölämpötilaa jopa 40 °C. Jännitystenpoistohehkutuksella voidaan myös palauttaa vanhenemisen aiheuttamat muutokset kylmämuokattuun rakenteeseen, myötölujuuden hieinan laskiessa. Normalisoinnilla pystytään sekä palauttamaan kylmämuokkauksen vaikutukset että pienentämään teräksen raekokoa nostamalla näin sitkeyttä. Termomekaanisesti valittujen terästen kohdalla on kuitenkin otettava huomioon niin jännitystenpoistohehkutuksen kuin normalisoinninkin aiheuttama lujuuden aleneminen. (Huhdankoski 2000, s. 20)

## 5 HITSAAUS MATALASSA LÄMPÖTILASSA

Arktisissa olosuhteissa työskenneltäessä on ensisijaisesti pyrittävä luomaan siedettävät hitsaus- ja työskentelyolosuhteet. Hitsattava kohta tulee pyrkiä suojaamaan tuulelta, sateelta ja lumelta. Matalissa lämpötiloissa ilman suhteellinen kosteus on yleensä matala, mutta kosteutta tiivistyy silti kappaleiden pinnoille hitsauksen yhteydessä. Kylmien työkappaleiden lämmittäminen tai kylmien puikkojen ja kappaleiden siirtäminen lämpimään tilaan johtavat välittömästi pintojen huurtumiseen. Kondensoitumislämpötila eli kastepiste riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta sekä ympäristön lämpötilasta (kuva 20). (Huhdankoski 2000, s. 30–31)



Kuva 20. Kastepiste ilman suhteellisen kosteuden ja ympäristön lämpötilan funktiona (Huhdankoski 2000, s. 31)



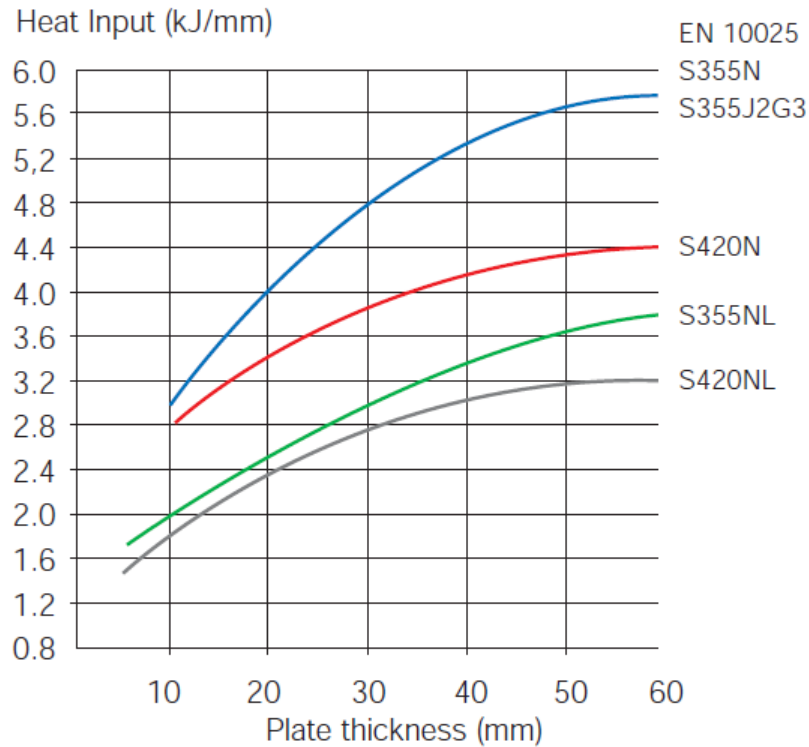
Kuten kondenssivesi, myös jää, vesi ja huurre ovat hitsauksen kannalta vaarallisia, sillä ne ovat vetylähteitä. Ne nopeuttavat myös hitsausliitoksen jäähtymistä. Matalissa lämpötiloissa vedyn diffuusio on hidasta, mikä lisää kylmähalkeilualttiutta sekä huokosten määrää ja sitä myöten haurasmurtumisvaaraa. Liitosten tarkastuksissa on huomioitava, että kylmähalkeama saattaa esiintyä vasta muutaman päivän päästä hitsauksesta. Kylmähalkeilun ja huokosten syntymisen ehkäisemiseksi voidaan liitoskohta esikuumentaa 50...100 °C:een. Esikuumentuksessa on turvallisinta käyttää vastusmattoja, sillä kaasupuhaltimen käyttö aiheuttaa pintojen huurtumista. Myös railo ja sen ympäristö sekä mahdollinen juurituki tulee puhdistaa ja kuivata ennen hitsausta. Puikkohitsaus tulee suorittaa käyttämällä niukkavetyisiä, emäksisiä lisäaineita. (Huhdankoski 2000, s. 31; Paasivuori 1991, s. 31)

## 5.1 Lämmöntuonti

Pienellä hitsausenergialla joudutaan mahdollisesti hitsaamaan useita palkoja. Korkean tuotavuuden tavoittelemiseksi sekä työkustannusten vähentämiseksi pyritäänkin hitsauksessa usein käyttämään korkeaa hitsausenergiaa ja sitä myötä korkeaa lämmöntuontia. Lämmöntuontia joudutaan kuitenkin tietyissä tapauksissa rajoittamaan hitsin mekaanisten ominaisuuksien takaamiseksi. Korkea lämmöntuonti aiheuttaa voimakasta rakeenkasvua muutosvyöhykkeellä. Rakeenkasvu puolestaan aiheuttaa sitkeyden kannalta epäsuotuisien mikrorakenteiden, kuten raerajaferritiin, syntymistä. Lämmöntuontia joudutaan rajoittamaan erityisesti korkean iskusitkeyden tai lujuuden omaavissa teräksissä sekä ohuemmillä rakenteilla. Lämmöntuonti tulisi aina valita pitäen rakenteen materiaalipaksuudet mielessä. Lämmöntuonti, levynpaksuus sekä monipalkohitsauksessa palkojen välinen lämpötila määräävät yhdessä jäähtymisnopeuden. Pääsääntönä paksummat materiaalit kestävät huomattavasti korkeampia lämmöntuonnin arvoja. Eräiden hienoraeterästen lämmöntuontirajoituksia on esitetty kuvassa 21. Monipalkohitsauksessa hitsiaineen iskusitkeyteen vaikuttaa merkittävästi lisäksi palkojärjestys, palkojen välinen lämpötila ja sitä myötä seuraavien palkojen lämpökäsittelyvaikutus. (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 18–20)

Ruukki on suorittanut useita tutkimuksia lämmöntuonnin vaikutuksista sekä laatinut teräksilleen suosituksia maksimilämmöntuonnin suhteen. Vuosina 2001–2002 suoritetuissa kokeissa testattiin lämmöntuonnin vaikutusta seostamattomalla rakenneteräksellä, Multisteel hienoraeteräksellä sekä termomekaanisesti valssatuilla hienoraeteräksillä. Levynpaksuudet kokeissa olivat 12 mm, 20 mm ja 40 mm. Hitsausprosessina oli jauhekaarhitsaus, joka mahdollistaa helposti suuren lämmöntuonnin, mitä varioitiin välillä 2...8 kJ/mm. Railomuoto 20 mm:n levyissä oli 45°:n puoli-V-railo ja 40 mm:n levyissä 60°/90° X-railo. Multisteel teräksen hitsauksessa käytettiin lisäaineita OK Autrod 12.22 sekä OK Flux 10.71. Lujien terästen hitsauk-

sessä käytettiin lisäaineita OK Autrod 13.27 sekä OK Flux 10.62, joilla saadaan monipalko-hitsauksessa hyvä iskutitkeys vielä -60 °C:ssa. Hitsattujen kappaleiden iskutitkeyksiä mitattiin hitsistä, sularajalta sekä muutosvyöhykkeeltä. Taulukossa 5 on esitetty iskutitkeyskokeiden tuloksia termomekaanisesti valssatuille hienoraeteräksille eri lämmöntuonnin arvoilla. (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 19–20)



Kuva 21. Hienoraeterästen lämmöntuontirajoituksia (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 19)

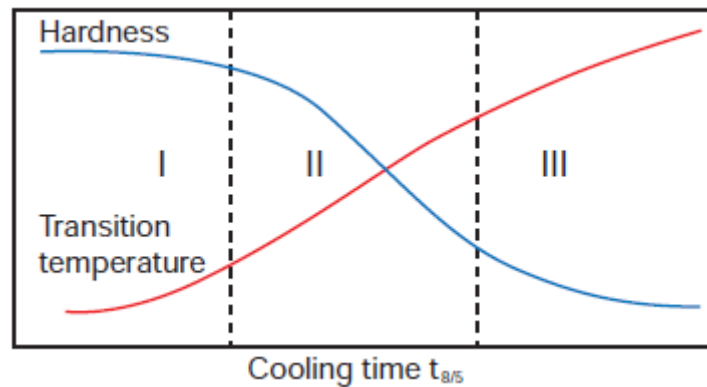
Taulukko 5. Iskutitkeyksiä M-teräksille eri lämmöntuonneilla (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 21)

Materiaali	Levynpaksuus [mm]	Lämmöntuonti Q [kJ/mm]	Jäähdytysaika $t_{8/5}$ [s]	Palkojen lkm.	Iskukokeen sijainti	Iskuenergia -20 °C [J]	Iskuenergia -40 °C [J]	Iskuenergia -50 °C [J]
S420 M/ML	20	5,5	98	5	Hitsi	177	162	155
					HAZ	240	205	162
	40	8,0	59	3+3	Hitsi	136	73	44
					HAZ	243	233	242
S460 M/ML	20	5,5	98	5	Hitsi	156	112	79
					HAZ	123	149	127
	40	8,0	59	3+3	Hitsi	201	157	102
					HAZ	241	207	195

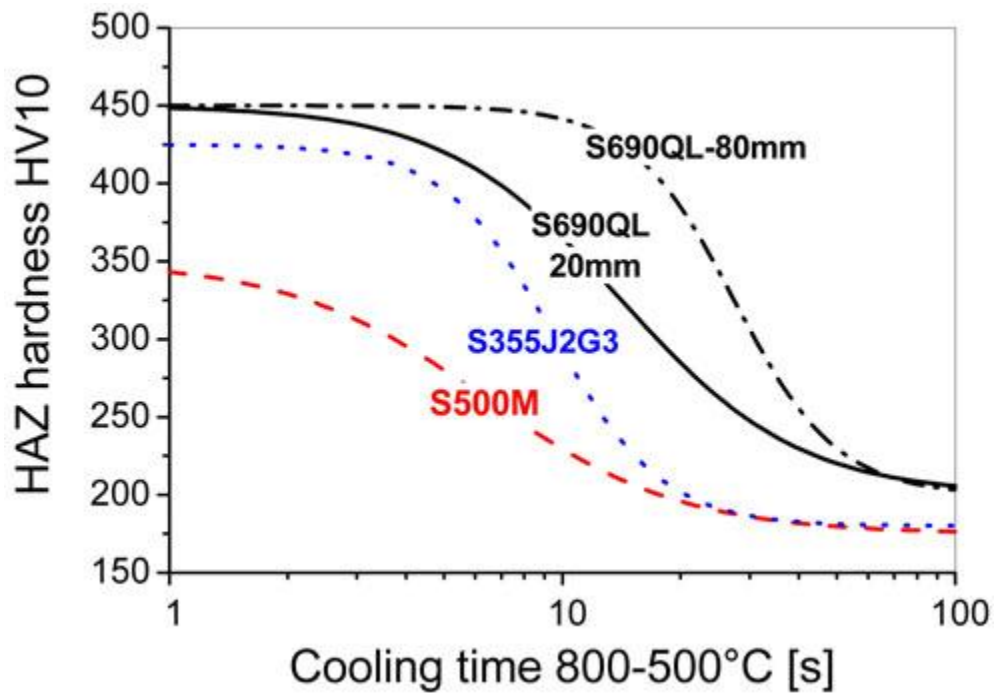
Termomekaanisesti valssatut teräkset S420 sekä S460 täyttivät ja ylittivät iskusitkeysvaatimukset alimpaankin testauslämpötilaan  $-50\text{ °C}$  asti. Ne kestivät hyvin jopa  $8\text{ kJ/mm}$  lämmöntonin ja useimpien liitosten iskuenergiat ylittivät  $100\text{ J}$  aina  $-50\text{ °C}$ :een saakka. Myös tavalliset seostamattomat rakenneteräkset kestivät hyvin korkeaa lämmöntonua. Levynpaksuudeltaan  $40\text{ mm}$ :n levyillä, lämmöntonilla  $7\text{ kJ/mm}$ , iskusitkeyden arvot täyttyivät lämpötilassa  $-20\text{ °C}$ . Levynpaksuudella  $20\text{ mm}$ ,  $5,5\text{ kJ/mm}$  lämmöntonilla, rakenneterästen jäähtymisajat pitenevät kuitenkin huomattavasti. Tällä levynpaksuudella maksimilämmöntonui on tutkimuksen mukaan noin  $4,5\text{ kJ/mm}$ , kun iskusitkeyskoeket suoritetaan lämpötilassa  $-20\text{ °C}$ . Kaikki liitokset täyttivät lisäksi perusmateriaalin lujuusvaatimukset lämmöntonin arvosta riippumatta. (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 19–20)

## 5.2 Jäähtymisaika

Hitsausliitoksen ominaisuuksiin vaikuttaa olennaisesti jäähtymisnopeus, joka puolestaan riippuu lämmöntonista ja hitsausenergiasta sekä levynpaksuudesta, liitosmuodosta ja työlämpötilasta. Jäähtymisaikaa kuvataan yleisesti suurella  $t_{8/5}$ , joka tarkoittaa liitoksen jäähtymisaikaa lämpötilavälillä  $800\text{...}500\text{ °C}$ . Juuri tällä lämpötilavälillä tapahtuvat tärkeimmät mikrorakennemuutokset hitsiaineen sekä muutosvyöhykkeen ominaisuuksien kannalta (kuva 22). Nopealla jäähtymisellä, esimerkiksi pienellä hitsausenergialla, suurella levynpaksuudella tai matalassa työlämpötilassa, syntyy martensiittisiä rakenteita ja liitoksen muutosvyöhykkeen kovuus nousee suureksi. Toisaalta nopeassa jäähtymisessä raekoko muodostuu pienemmäksi, jolloin transitiolämpötila vastaavasti muodostuu matalaksi. Hitaassa jäähtymisessä, käytettäessä korkeaa lämmöntonua tai esikuumennusta, liitoksen transitiolämpötila sen sijaan jää korkeammaksi sekä kovuus alhaisemmaksi. Tämä johtuu karkearakeisempien bainiittisten ja ferriittisten mikrorakenteiden syntymisestä. Optimaalisten mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseksi jäähtymisaika tulisi olla näiden ääripäiden välillä, kuvassa 22 alueella II. Kuvassa 23 on esitetty eri teräslaatuojen muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen kovuusarvoja jäähtymisajan funktiona. Kuvasta huomataan selvästi levynpaksuuden vaikutus sekä M-teräksen matalampi kovuus. (Vähäkainu 1998, s. 22, Willms 2009, s. 601)



Kuva 22. Jäähdytysajan vaikutus hitsausliitoksen muutosvyöhykkeen kovuuteen sekä liitoksen transiitolämpötilaan (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 18)



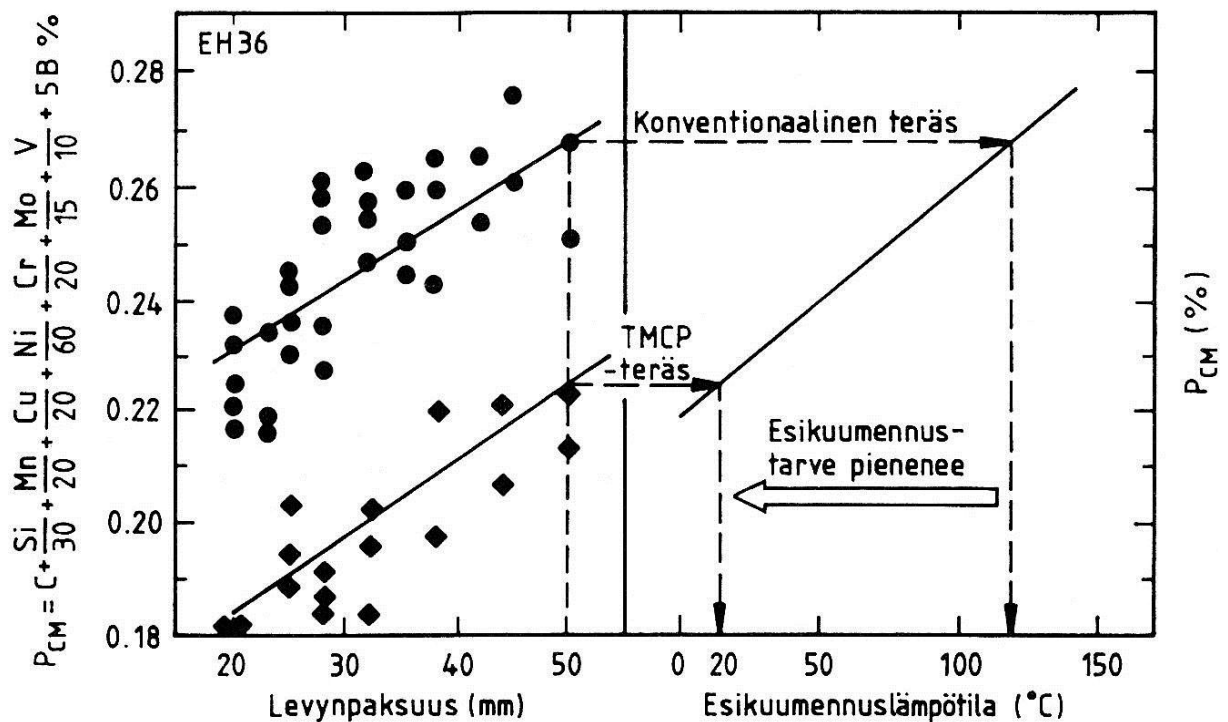
Kuva 23. Muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen kovuusarvoja jäähdytysajan  $t_{8/5}$  funktiona eri teräslaaduilla ja levynpaksuuksilla (Willms 2009, s. 601)

Lämmöntuonnin enimmäisarvojen lisäksi Ruukki on julkaissut myös enimmäisarvoja jäähdytysajoille eri teräslaaduille. Taulukossa 6 on esitetty jäähdytysnopeuden enimmäisarvoja useille mataliin käyttölämpötiloihin soveltuville hienoraeteräslaaduille. (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 19)

Taulukko 6. Jäähtymisaikojen enimmäisarvoja hienoraeteräksille (Lukkari & Vähäkainu 2003, s. 19)

Nimike	Jäähtymisaika t <sub>8/5</sub> [s]	Iskukokeen lämpötila T [°C]
S355N	30	-20
S355NL	20	-40
S420N	25	-20
S420NL	15	-40
S355M	40	-20
S355ML	30	-50
S420M	35	-20
S420ML	25	-50
S460M	35	-20
S460ML	25	-50
S500M	35	-20
S500ML	25	-50

Työlämpötila vaikuttaa merkittävästi hitsausliitoksen jäähtymisaikaan. Korotettu työlämpötila voi tulla kyseeseen esimerkiksi suurilla ainepaksuuksilla tai hitsattaessa runsaammin seostettuja teräksiä. Termomekaanisesti valssatuilla teräksillä on pienempi korotetun työlämpötilan tarve kuin esimerkiksi HSLA-nuorrutusteräksillä tai perinteisesti valmistetuilla teräksillä. Tämä johtuu M-terästen matalasta hiilikvivalenttiarvosta. Kuvassa 24 on esitetty konventionaalisesti ja termomekaanisesti valssatun EH36-laivanrakennusteräksen suositeltu esikuumentuslämpötila levynpaksuuden ja  $P_{cm}$ -säröparametrin funktiona. Työlämpötilaa voidaan korottaa esimerkiksi esikuumentamalla kappaleita tai monipalkohitsauksessa sopivalla hitsausjärjestyksellä. Jäähtymisaika tietystä työlämpötilassa voidaan laskea kaavojen avulla tai selvittää kuvaajista. Jäähtymisaikaa voidaan käyttää jatkuvan jäähtymisen S-käyrien kanssa hitsiaineen mikrorakenteen ennustamiseen. (Vähäkainu 1998, s. 19, 23–25, 36; Härkönen & Tervola 1993, s. 88)



Kuva 24. Konventionaalisesti ja termomekaanisesti valssatun EH36-laivanrakennusteräksen esikuumennustempötila levynpaksuuden ja  $P_{cm}$ :n funktiona (Nevasmaa et al. 1987, s. 34)

### 5.3 Kylmähalkeilu

Eräs niukkaseosteisten terästen suurimmista vaaroista on vety- eli kylmähalkeilu. Kylmähalkeamat syntyvät noin 100...150 °C:n lämpötilassa yleensä muutosvyöhykkeeseen, mutta voivat esiintyä myös hitsissä ja voivat olla joko pituus- tai poikittaissuuntaisia. Kylmähalkeamat ovat erityisen vaarallisia, koska ne eivät aina ulotu hitsin pintaan asti ja niiden kehittyminen saattaa kestää jopa kaksi vuorokautta. Kylmähalkeilu edellyttää kolmen tekijän läsnäoloa: kovaa ja haurasta martensiittista mikrorakennetta, hitsiin liuennutta vetyä sekä hitsauksesta aiheutuneita jäännösjännityksiä. Merkittävimmin martensiitin kovuuteen vaikuttaa hiilipitoisuus, mutta myös muilla seosaineilla on vaikutusta. Hitsin jäähtyessä vapaat vetyatomit aiheuttavat jännityksiä, jotka voivat johtaa halkeaman syntyyn. Jäännösjännitysten voimakkuuteen vaikuttavat esimerkiksi lisäaineen lujuus, rakenteen jäykkyys ja ainepaksuus. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2009, s. 111, 131; Ruukki 2011, s. 7)

Kylmähalkeilutaipumusta voidaan ehkäistä vähentämällä tai eliminoimalla sen syntytekijöitä seuraavilla tavoilla (Ruukki 2011, s. 15; Seppälä 1998, s. A1.2):

- estämällä martensiitin muodostumista alentamalla jäähtymisnopeutta
  - esikuumennuksen avulla
  - suurella hitsausenergialla
  - käyttämällä korotettua työlämpötilaa
- kontrolloimalla vedyn määrää liitoksessa
  - käyttämällä niukkavetyistä hitsausprosessia
  - käyttämällä niukkavetyisiä, puhtaita ja kuivia lisäaineita
  - kuivaamalla ja puhdistamalla railopinnat
- vähentämällä hitsausjännityksiä
  - oikeaoppisella rakenteen ja hitsirailon suunnittelulla
  - käyttämällä alilujaa lisäainetta lujusvaatimusten salliessa
  - käyttämällä austeniittista lisäainetta.

Hitsin vetyttöisyys tulisi pyrkiä saamaan mahdollisimman alhaiseksi, alle 5 ml/100 g hitsiainetta, käyttämällä sopivaa hitsausprosessia ja lisäaineita. Korotetulla työlämpötilalla ja sopivalla lämmöntuonnilla pystytään rajoittamaan jäähtymisnopeutta martensiittisen rakenteen ehkäisemiseksi. Etenkin hienoraeterästen tapauksessa tulee kuitenkin pitää mielessä lämmöntuontirajoitukset kuumahalkeilun ja rakeenkasvun estämiseksi. Monipalkohitsauksessa palkojen välisen lämpötilan tulee olla riittävän korkea. Kylmähalkeiluriskiä voidaan lisäksi pienentää käyttämällä matalahiilisiä teräksiä ja lisäaineita sekä suorittamalla sopiva jälkilämpökäsittely, jos mahdollista. (Ruukki 2011, s. 15; Seppälä 1998, s. A1.2)

Oikea työlämpötila valitaan teräslajin, ainepaksuuden, lämmöntuonnin sekä lisäaineen perusteella. Korotetun työlämpötilan tai esikuumennuksen tarve nousee hiiliäkvivalentin, kovuuden ja ainepaksuuden myötä. Monipalkohitsauksessa edellisen hitsipalon tuoma lämpö voi olla riittävä oikean palkojen välisen lämpötilan ylläpitämiseksi. (Ruukki 2011, s. 16)

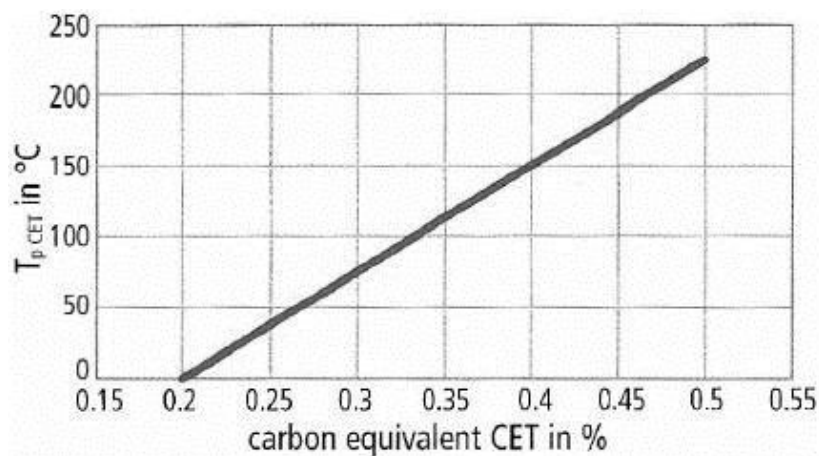
Teräksen hitsattavuuden sekä kylmähalkeiluriskin arviointiin voidaan käyttää teräksen kemiallisen koostumuksen pohjalta laskettavaa hiiliäkvivalenttia. Hiiliäkvivalentti perustuu karkevuuden arviointiin sitä lisäävien seosaineiden pitoisuuksien pohjalta. Hiiliäkvivalenttikaavoja on useita erilaisia, mutta yleisimmin käytetty on IIW:n kaava CE, kaava (4). Nyrkkisääntönä CE:n kohdalla on, että teräs on kylmähalkeilualttiuden kannalta hyvin hitsattavaa, jos hiiliäkvivalentti on alle 0,41. Arvoilla 0,41...0,45 voidaan myös saavuttaa hyvä hitsilaatu käyttämällä niukkavetyisiä lisäaineita ja sopivaa esikuumennusta. IIW:n kaava soveltuu parhaiten seostamattomille ja niukkaseosteisille rakenneteräksille. CE on määritelty standardissa SFS-EN 1011-2, joka myös tarjoaa kaksi tapaa esikuumennustarpeen selvittämiseksi. Tapa A

perustuu graafiseen määrittämiseen ja käyttää hiilikvivalenttia CE ja tapa B puolestaan perustuu laskennalliseen menetelmään ja sen kanssa käytetään toista hiilikvivalenttia, CET, kaava (5). Kuvassa 25 on esitetty CET-hiilikvivalentin vaikutus suositeltavaan esikuumennuslämpötilaan. Moderneille lujille, matalahiilille teräksille pätee paremmin japanilainen säröparametri  $P_{cm}$ , kaava (6).  $P_{cm}$  pätee paremmin myös silloin kun jäähtymisaika on pieni. Amerikkalainen standardi AWS D1.1 sisältää kolmannen tavan esikuumennustarpeen määrittämiseksi. Kyseinen menetelmä käyttää  $P_{cm}$ -säröparametria sekä eroaa myös muuten hieinan standardissa SFS-EN 1011-2 esitetyistä tavoista. Taulukossa 7 on eroteltu kaikki kolme mainittua menetelmää niiden käyttämien muuttujien perusteella. (Lukkari 2007, s. 20, 23; Vähäkainu 1998, s. 35; von Busch 2010, s. 37–39)

$$CE (\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4)$$

$$CET (\%) = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5)$$

$$P_{cm} (\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (6)$$



Kuva 25. Esikuumennuslämpötila CET-hiilikvivalentin funktiona standardin SFS-EN 1011-2 mukaan laskettuna. (von Busch 2010, s. 41)



Taulukko 7. Esikuumennustarpeen määrittämiseen kehitettyjen tapojen vertailu (von Busch 2010, s. 37)

EN 1011-2 Tapa A	EN1011-2 Tapa B	AWS D1.1 Annex XI
1. Hiilielkivivalentti CE	1. Hiilielkivivalentti CET	1. Säröparametri $P_{cm}$
2. Lisäaineen vetypitoisuus	2. Lisäaineen vetypitoisuus	2. Lisäaineen vetypitoisuus
3. Yhdistetty levynpaksuus	3. Levynpaksuus	3. Levynpaksuus
4. Lämmöntuonti	4. Lämmöntuonti	4. Jäännösjännitykset
5. Graafinen esikuumennustarpeen määrittäminen	5. Laskennallinen esikuumennustarpeen määrittäminen	5. Taulukoihin perustuva esikuumennustarpeen määrittäminen

Menetelmien mukaiset esikuumennuslämpötilat 50 mm paksulle E36-laivanrakennusteräkselle lämmöntuonnin ja lisäaineen vetypitoisuuden funktiona on esitetty taulukossa 8. Esimerkissä on hitsattu päittäisliitoksena 50 mm paksuja levyjä lämmöntuonneilla 1 kJ/mm ja 2,5 kJ/mm sekä lisäaineen vetypitoisuuksilla 5 ja 10 ml/100 g hitsiainetta. Laskelmissa on AWS:n menetelmän kannalta oletettu liitoksen olevan jäykkä, esimerkiksi korjaushitsauksen tapauksessa. Kaavojen antamat hiilielkivivalentit on myös esitetty taulukossa 8. (von Busch 2010, s. 39)

Taulukko 8. Esikuumennuslämpötiloja E36-laivanrakennusteräkselle ( $s = 50$  mm) lämmöntuonnin ja lisäaineen vetypitoisuuden funktiona eri menetelmillä laskettuna (von Busch 2010, s. 40–41)

Vety- pitoisuus	Lämmöntuonti	SFS-EN 1011-2 Tapa A (CE)	SFS-EN 1011-2 Tapa B (CET)	AWS D1.1 ( $P_{cm}$ )	
				Liitoksen jäykkyys	
				Korkea	Matala
5 ml/ 100 g	1,0 kJ/mm	50 °C	129 °C	150 °C	40 °C
	2,5 kJ/mm	Ei esikuumennustarvetta	106 °C	150 °C	40 °C
10 ml/ 100 g	1,0 kJ/mm	125 °C	159 °C	150 °C	95 °C
	2,5 kJ/mm	Ei esikuumennustarvetta	136 °C	150 °C	95 °C
Hiilielkivivalentti / säröparametri		0,449	0,317	0,267	0,267

Taulukosta 8 nähdään että sekä lämmöntuonti että vetypitoisuus vaikuttavat huomattavasti esikuumennustarpeeseen SFS-EN 1011-2 standardin mukaisilla menetelmillä. Vetypitoisuus vaikuttaa tietysti myös  $P_{cm}$ -kaavaan perustuvassa menetelmässä, mutta koska kyseinen menetelmä perustuu rakenteen jäännösjännitysten eli toisin sanoen liitoksen jäykkyyden pohjalta suoritettavaan arviointiin, ei vetypitoisuuden muutoksella ole yhtä merkittävää vaikutusta. AWS:n menetelmä ei myöskään ota huomioon hitsauksessa käytettävää lämmöntuontia. Valmistajan kannalta sopivin arviointimenetelmä riippuu rakenteen jäykkyydestä. Esimerkiksi korjaushitsauksessa, jossa kappaleet ovat jo valmiiksi jäykästi paikallaan, taloudellisin menetelmä on ensimmäinen, mutta vapaamman liitoksen tapauksessa AWS:n menetelmä saattaa olla sopivampi. Tietenkin täytyy muistaa että kyseiset menetelmät ovat vain ohjeellisia eivätkä anna absoluuttisen tarkkoja arvoja. (von Busch 2010, s. 39–41)

#### 5.4 Hitsausprosessit

Hitsausprosessin valinnassa tulee ottaa huomioon hitsattavien terästen lämmöntuontirajoitukset sekä hitsauksen suoritustapa. Erityisesti lujien terästen kohdalla ja teräksen iskutheyden laatuluokan noustessa korostuvat hitsausprosessi ja -tapa sekä lämmöntuonti. Kaikilla tavanomaisilla hitsausprosesseilla pystytään kuitenkin saavuttamaan hyvä liitoksen iskutkeys pitämällä lämmöntuonti terästen suositusten rajoissa. Mekanisoidulla hitsauksella tai kapearailotekniikoilla saavutetaan pääsääntöisesti paremmat iskutheyden arvot kuin käsinhitsauksella. Myös suurtehoprosesseilla voidaan hitsata mataliin käyttölämpötiloihin tarkoitettuja rakenteita iskutheyden merkittävästi kärsimättä. (Vähäkainu 1998, s. 29)

#### 5.5 Lisäaineet

Perusaine määrää yleensä lisäaineelta vaadittavan lujuuden ja sitkeyden sekä lisäksi hitsausenergian ja usein myös hitsausmenetelmän. Perusaineen lisäksi myös hitsiaine voi asettaa vaatimuksia. Näin ollen lisäaine voi olla mahdotonta valita ainoastaan hitsiaineen iskutheyden perusteella. Kuumavalssattujen terästen hitsauksessa lisäaine vastaa yleensä perusaineen koostumusta. Seostamattomien rakenneterästen hitsaukseen soveltuvat mangaaniseosteiset lisäaineet, joilla hitsiaineesta saadaan sitkeää vielä  $-40\text{ °C}$ :ssa. Lujilla ja sitkeillä teräksillä lisäaineen tulee olla perusainetta seostetumpi, jotta perusaineen korkeat mekaaniset ominaisuudet täytyvät myös hitsiaineessa. Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi nikkelillä, kuparilla ja molybdeenillä seostettuja lisäaineita. Nämä lisäaineet kestävät myös korkeampia hitsausenergioita. Laivanrakennusterästen kanssa tulee käyttää luokitusseurojen hyväksymiä lisäaineita. (Tihekari & Karppi 1984, s. 35; Vähäkainu 1998, s. 29–30)

Tihekarin ja Karpin (1984) tutkimusten mukaan mangaani-pii-seosteiset lisäaineet soveltuvat arktisiin olosuhteisiin hitsausenergian ollessa alle 2,5 kJ/mm. Jauhekaarihitsauksessa matalalla hitsausenergialla saavutettiin iskukokeissa yli 40 J:n arvoja lämpötilassa -60 °C. Korkea Mn/Si-suhde, 3,0 jauhekaarilisäaineella OK Flux 10.62, edesauttaa hienorakeisen mikrorakenteen syntymistä muodostamalla epämetallisia sulkeumia, jotka toimivat kiteytymisytiminä. MAG-lisäaineella, jonka Mn/Si-suhde oli 2,0, hitsiaineeseen syntyi karkearakeinen mikrorakenne ja iskukokeiden arvot jäivät alle 20 J. (Tihekarin & Karppi 1984, s. 35–36)

Nikkeliseosteisella lisäaineella saavutetaan parempia iskusitkeyden arvoja mangaani-pii-seosteiseen lisäaineeseen verrattuna niin matalalla kuin korkeillakin hitsausenergioilla. Hitsausenergian ollessa yli 2,5 kJ/mm nikkeliseosteinen lisäaine on varmempi valinta, sillä se ei ole yhtä herkkä rakeenkasvulle kuin mangaani-pii-seosteinen lisäaine. Nikkeliseosteinen lisäaine on kuitenkin kalliimpaa, jolloin sen käyttö ei aina ole kannattavaa. (Tihekarin & Karppi 1984, s. 36)

Nikkeli-molybdeeni-seosteisella lisäaineella (OK Autrod 13.29) saavutettiin Tihekarin ja Karpin (1984) tutkimuksissa hienorakeinen hitsiaine, mutta iskusitkeys jäi mangaani-pii-seosteista jauhekaarihitsiä alhaisemmaksi. Hitsiaine oli huomattavasti lujempaa kuin muiden lisäaineiden hitseissä, mikä johtui seosainekarbidien erkautumisesta. Erkaumien lujittava vaikutus aiheutti hitsin sitkeyden heikkenemisen. Runsaasti seostettujen lisäaineiden kanssa voidaan käyttää korkeampaa hitsausenergiaa vähentämään palkojen määrää ja näin ollen lieventämään erkautumien syntymistä alemmissa paloissa. (Tihekarin & Karppi 1984, s. 36)

## **6 TUTKIMUSTULOKSIA**

Seuraavissa kappaleissa on esitetty tuloksia hienoraeterästen sitkeyttä matalissa lämpötiloissa (vähintään -60 °C) käsittelevistä tutkimuksista. Kappaleessa 6.1 on käsitelty yleisiä hienoraeteräksiä myötölujuusalueella 355...460 MPa. Kappaleessa 6.2 on esitetty tutkimustuloksia putkiterästen sitkeydestä myötölujuusluokassa 555...690 MPa.

### **6.1 Yleiset hienoraeteräkset**

Tässä kappaleessa käsitellään tutkimustuloksia hienoraeterästen lujuus- ja sitkeysominaisuuksista eri myötölujuusluokissa. Tutkimuksissa on varioitu mm. hitsausprosessia, lisäaineita ja lämmöntuontia. Kappaleessa käsitellään sekä normalisoituja että kontrolloidusti tai termomekaanisesti valssattuja hienoraeteräksiä myötölujuusalueella 355...460 MPa.

6.1.1  $R_e = 355 \text{ MPa}$ 

Tihekari ja Karppi (1984) tutkivat VTT:llä mikrorakenteen vaikutusta hienoraeteräksen iskusitkeyteen  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa. Kokeissa hitsattiin Ruukin Raex 386 P Arctic hienoraeterästä. Levynpaksuutena oli 40 mm. Vastaava, nykyinen teräs on standardin SFS-EN 10028-3 mukainen normalisoitu hitsattava hienoraeteräs P355NL2. Hitsausmenetelminä käytettiin jauhekaari-, MAG- ja puikkohitsausta. Kokeissa käytettiin neljää eri lisäainetta, joiden lisäksi varioitiin hitsausenergiaa. Perusaineen kemiallinen koostumus on ilmoitettu valmistajan sulatusanalyysistä (taulukko 9) ja mekaaniset ominaisuudet VTT:n mittausten perusteella (taulukko 10). (Tihekari & Karppi 1984, s. 15)

Taulukko 9. Raex 386 P Arctic (nykyinen vastaava P355NL2) teräksen kemiallinen koostumus (Tihekari & Karppi 1984, s. 15)

C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	N [%]	Al [%]	Nb [%]	V [%]
0,14	0,33	1,49	0,009	0,021	0,010	0,038	0,029	0,012

Taulukko 10. Raex 386 P Arctic (nykyinen vastaava P355NL2) teräksen mekaanisia ominaisuuksia (Tihekari & Karppi 1984, s. 15)

Vetokoe						Charpy-V iskukoe	
Koelämpötila	$R_{eH}$ [MPa]	$R_{eL}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	Z [%]	Koelämpötila	$K_V$ [J]
+20 $^\circ\text{C}$	366	361	508	33	78,5	-60 $^\circ\text{C}$	162
-60 $^\circ\text{C}$	388	378	568	37	77		

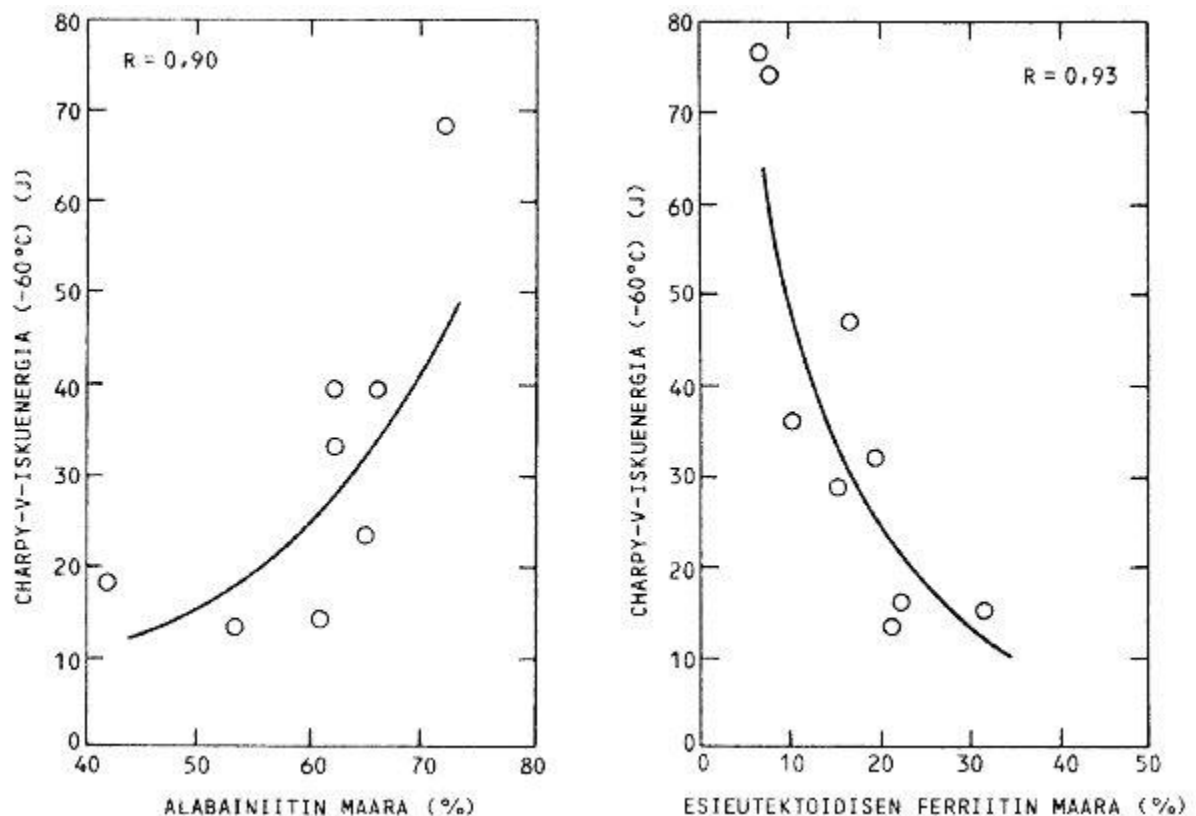
Hitsauskokeet suoritettiin ilman esikuumennusta  $K-45^\circ$  hitsirailoihin. Pohjapalot hitsattiin manuaalisesti MAG-hitsauksena lisäaineella OK Autrod 12.51. Hitsausenergiat jauhekaarihitsauksessa olivat 1,7, 3 ja 5 kJ/mm sekä MAG-hitsauksessa 1,7 ja 3 kJ/mm. MAG-hitsaus suoritettiin mekanisoidusti. Puikkohitsauksen keskimääräiset hitsausenergiat olivat 1,5 ja 2,3 kJ/mm. Charpy-V-iskukokeet suoritettiin  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa siten, että jokaista loven sijaintia kohden suoritettiin viisi iskukoetta. Sitkein hitsiaine saavutettiin puikkohitsauksessa, kun taas korkein sularajalta mitattu muutosvyöhykkeen sitkeys saatiin jauhekaarihitsauksessa hitsausenergialla 1,7 kJ/mm (taulukko 11). (Tihekari & Karppi 1984, s. 16–17)

Taulukko 11. Raex 386 P Arctic teräsliadun iskutitkeyksiä eri hitsausprosesseilla ja hitsausenergioilla (Tihekari & Karppi 1984, s. 25)

Hitsaus		Charpy V-iskuenergian keskiarvo -60 °C:ssa [J]	
Hitsausmenetelmä + lisäaine	Hitsausenergia [kJ/mm]	Hitsiaineessa	Sularajalla
Jauhekaari OK Autrod 12.22 / OK Flux 10.62	1,7	47	68
	3,0	32	33
	5,0	15	18
MAG OK Autrod 12.64 / CO <sub>2</sub>	1,7	16	23
	3,0	13	13
MAG OK Autrod 13.29 / 80 % Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	1,7	36	-
	3,0	29	14
Puikko OK 73.68	1,5	77	39
	2,3	74	39

Tutkimuksissa suuremmalla hitsausenergialla hitsaaminen aiheutti sekä hitsiaineen raekoon että esieutektoidisen ferriitin määrän kasvua. Yli 3 kJ/mm hitsausenergialla hitsiaineen mikrorakenteen muutokset olivat huomattavan suuria. Muutosvyöhykkeen karkearakeinen alue koostui 1,7 kJ/mm hitsausenergialla alabainiitista. Hitsausenergian kasvattaminen johti myös muutosvyöhykkeessä karkearakeisen ferriitin syntymiseen. Korkeampi hitsausenergia laski lisäksi sekä hitsiaineen että muutosvyöhykkeen karkearakeisen alueen iskutitkeyttä. (Tihekari & Karppi 1984, s. 25)

Hienoraeteräksen muutosvyöhykkeen karkearakeinen alue koostui pääasiassa alabainiitista. Lisäksi siinä esiintyi karkearakeisempaa esieutektoidista ja sälemäistä ferriittiä sekä martensiittia. Monipalkohitsauksessa tapahtui alempien palkojen normalisoitumista, mikä vähensi mikrorakenteen sälemäisyyttä. Tutkimusten perusteella alabainiitin määrän lisääminen vaikuttaa edullisesti iskutitkeyteen, joka johtuu alabainiitin pienestä raekoosta. Lämpötilassa -60 °C sularajalta suoritettujen iskukokeiden perusteella iskuenergian arvot ylittivät 40 J, kun alabainiitin määrä oli noin 70 %. Esieutektoidinen ferriitti puolestaan vaikuttaa iskutitkeyteen negatiivisesti. Kuvassa 26 on esitetty alabainiitin ja esieutektoidisen ferriitin määrän vaikutus hienoraeteräksen iskutitkeyteen -60 °C:ssa. (Tihekari & Karppi 1984, s. 28)

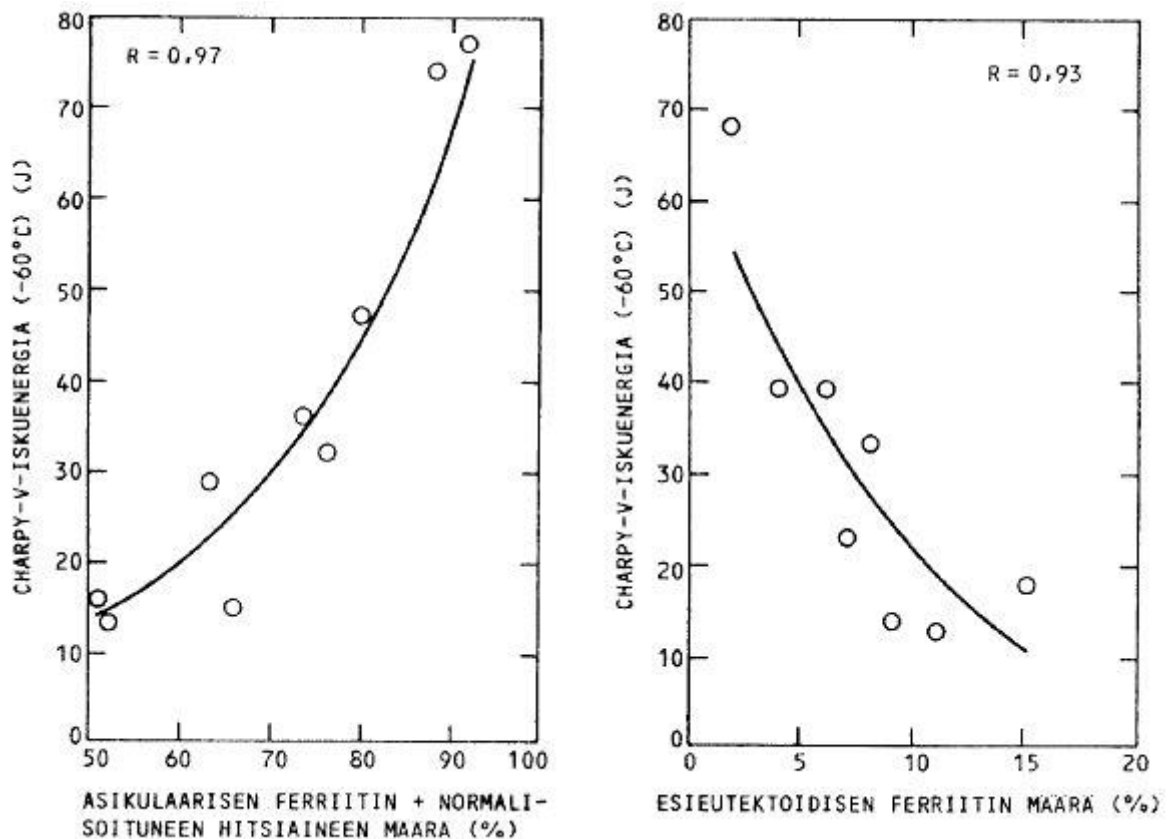


Kuva 26. Alabainiitin sekä esieutektoidisen ferriitin vaikutus sularajalta mitattuihin iskusitkeyden arvoihin -60 °C:ssa (Tihekari & Karppi 1984, s. 29)

Mikrorakenteen lisäksi muutosvyöhykkeen iskusitkeyteen vaikuttavat hitsauksessa erkautuvat seosainekarbidit. Erkaumien määrään vaikuttaa olennaisesti käytetty hitsausenergia sekä mahdollinen palonlevitys niin, että matalalla hitsausenergialla sekä ilman palonlevitystä syntyy vähiten erkaumia. Tämä vastaa hyvin saatuja tuloksia, sillä korkeimmat iskusitkeyden arvot sularajalla (68 J) saavutettiin hitsausenergian arvolla 1,7 kJ/mm jauhekaarhitsauksessa, jossa ei mekanisoinnista johtuen tapahtunut palonlevitystä. Näin ollen korkeammalla hitsausenergialla tai puikkohitsauksessa, jossa tapahtuu käsinhitsauksesta johtuen palonlevitystä, iskusitkeyden arvot olivat alhaisempia. Mikrooseostettujen hienoraeterästen hitsauksessa korkea hitsausenergia vaikuttaa negatiivisesti muutosvyöhykkeen iskusitkeyteen erkaumien syntymisen lisäksi hitaan jäähtymisnopeuden aiheuttaman karkearakeisen ferriitin syntymisen johdosta. (Tihekari & Karppi 1984, s. 29–30)

Lämpökäsittämättömän hitsiaineen mikrorakenne koostui esieutektoidisesta, asikulaarisesta ja sälemäisestä ferriitistä. Monipalkohitsauksen normalisoiva vaikutus hävitti hitsiaineen raerajavyöhykkeet sekä pienensi sälemäisen ferriitin raekokoa. Hitsiaineen iskusitkeyteen vaikuttivat -60 °C:ssa tutkimusten perusteella positiivisesti hienorakeinen asikulaarinen ferriit-

ti sekä normalisoitunut hitsiaine ja negatiivisesti esieutektoidinen ferriitti (kuva 27). Kun asikulaarisen ferriitin ja normalisoituneen hitsiaineen osuus oli 80 %, saatiin iskukokeista 40 J iskuenergian arvoja  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa. Näiden faasien edullinen vaikutus iskutheyteen selittyy niiden pienellä raekoolla. Esieutektoidisen ferriitin epäedullinen vaikutus puolestaan selittyy karkearakeiseen mikrorakenteeseen syntyvien korkeiden leikkausjännitysten aiheuttamien mikrosäröjen sekä yhtenäisten raerajavyöhykkeiden mahdollistaman raerajamurtuman. Esieutektoidisen ferriitin lisäksi karkearakeinen sälemäinen ferriitti heikentää iskutheyttä. Lämpökäsittelemättömän sälemäisen ferriitin raekoko vastaa perinnäisen austeniitin raekoko. (Tihekari & Karppi 1984, s. 32–33)



Kuva 27. Asikulaarisen ferriitin ja normalisoituneen hitsiaineen sekä esieutektoidisen ferriitin vaikutus hitsiaineen iskutheyden arvoihin  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa (Tihekari & Karppi 1984, s. 33)

### 6.1.2 $R_e = 420\text{ MPa}$

Akselsen et al. (2011) selvittivät lujan ( $R_e = 420\text{ MPa}$ ) jauhekaarihitsatun teräksen mekaanisia ominaisuuksia lämpötilassa  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Materiaalina käytettiin 50 mm paksua levyä kontrolloidusti valssatusta lujasta teräksestä, jonka myötölujuus oli 420 MPa. Perusaineen kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet huoneenlämpötilassa ja  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa on esitetty

taulukossa 12. Hitsaus suoritettiin puoli-V-railoon (35°) suoran sularajan saavuttamiseksi. Pohjapalkko hitsattiin täytelanka-MAG-prosessilla ja täyttöpalkot jauhekaariprosessilla. Pohjapalkojen lämmöntuonti oli 3,1...3,6 kJ/mm ja täyttöpalkojen 1,9...2,8 kJ/mm. (Akselsen et al. 2011, s. 414)

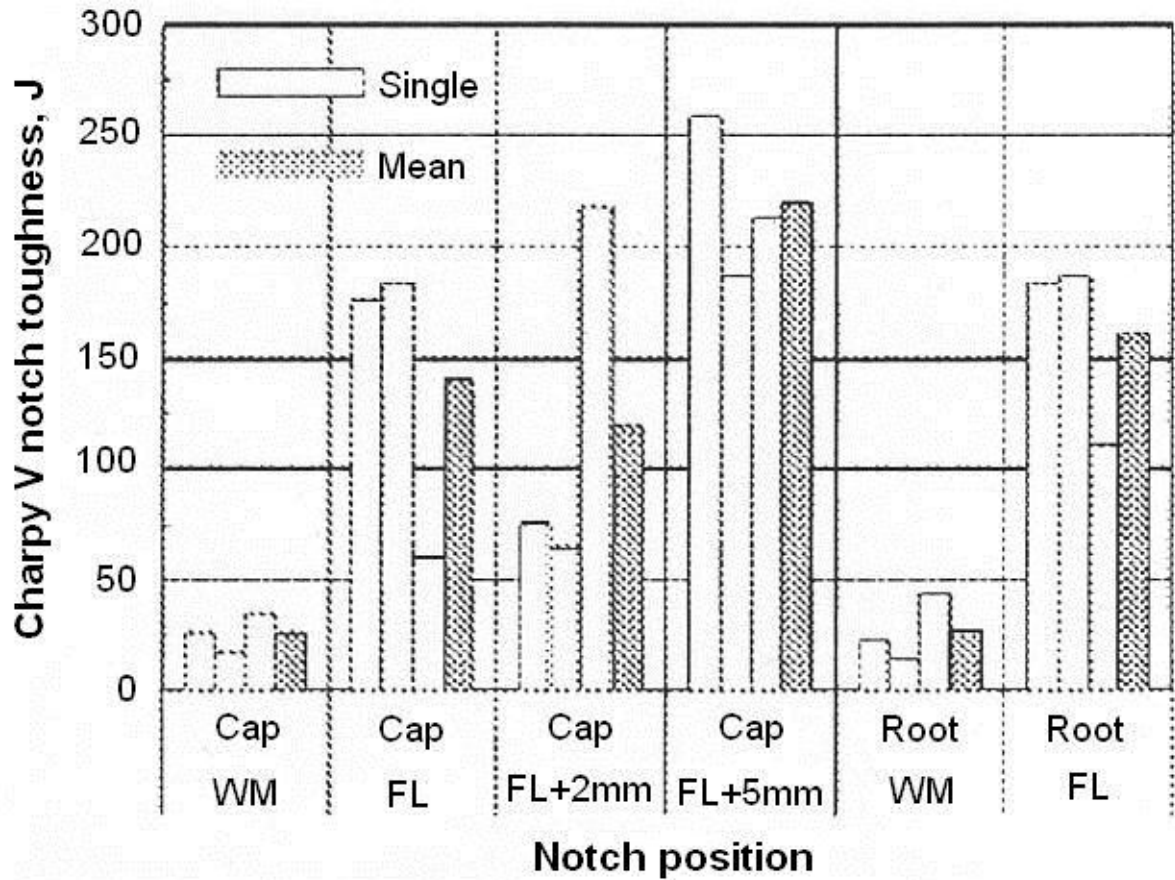
Taulukko 12. Kontrolloidusti valssatun lujan teräksen ( $R_e = 420$  MPa) kemiallinen koostumus ja mekaanisia ominaisuuksia (Akselsen et al. 2011, s. 414)

Kemiallinen koostumus					
C	Si	Mn	Cu	Ni	Nb
0,09	0,19	1,54	0,28	0,7	0,013
Mekaaniset ominaisuudet					
Lämpötila	Kimmokerroin [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	Z [%]
Huoneenlämpötila	209	565	619	26	71
	209	539	604	28	73
-60 °C	213	587	673	28	68
	214	631	694	26	69

Vetokokeissa käytettiin hitsiaineesta valmistettuja 50x8 mm<sup>2</sup> vetosauvoja. Charpy V -koesauvat olivat tyypillisiä 10x10x55 mm<sup>3</sup> sauvoja. Iskukoesauvoja valmistettiin 4 sarjaa loven ollessa hitsiaineessa, sularajalla, sularajalta 2 mm perusaineeseen sekä sularajalta 5 mm perusaineeseen. Juuren puolelta iskusauvat valmistettiin ainoastaan hitsiaineesta ja sularajalta. Murtumissitkeyttä selvitettiin kolmella eri murtumismekaniikan geometriaan perustuvalla koesarjalla, joista jokaisessa suoritettiin 20 koetta. CTOD-arvot laskettiin koesauvoista standardin BS7448 mukaan. (Akselsen et al. 2011, s. 415)

Vetokokeista saatujen tulosten perusteella sekä myötö- että murtolujuus nousivat lämpötilan laskiessa huoneenlämpötilasta -60 °C:een. Iskukokeiden tuloksista puolestaan havaittiin iskusitkeyden olevan erittäin korkea muutosvyöhykkeessä sekä hitsin pinta- että juuripuolella. Kyseisellä materiaalilla saavutetut muutosvyöhykkeen iskusitkeysarvot todennäköisesti myös täyttäisivät rakenteille asetetut sitkeysvaatimukset -60 °C:n lämpötilassa. Toisaalta itse hitsiaineen iskusitkeysarvot jäivät huomattavasti muutosvyöhykettä alhaisemmiksi, 15...45 J, mitkä eivät täytä oletettavasti vaadittavia arvoja alhaisissa lämpötiloissa. Kuvassa 28 on esitetty iskukokeiden tulokset. (Akselsen et al. 2011, s. 415–416)





Kuva 28. Iskusitkeyksiä eri kohdista koekappaleita (Akselsen et al. 2011, s. 416)

Muutosvyöhykkeessä esiintyi suhteellisen vähän alhaisia murtumissitkeyden arvoja. Suurin osa arvoista oli yli 0,2 mm, joka on esimerkiksi Pohjanmerelle suunnitelluissa rakenteissa minimiarvo CTOD-kokeissa. Eri geometrioilla suoritettavat testit tuottivat pienillä arvoilla samankaltaisia tuloksia, mutta yli 0,35 mm CTOD-arvoista ylöspäin tulokset alkoivat hajaantua. Hitsiaineesta otetuissa näytteissä CTOD-arvot poikkesivat eri geometrioilla huomattavasti enemmän kuin muutosvyöhykkeessä. Mikrorakenteen analyysien perusteella alhaisemmat arvot johtuivat särön kehitymisestä karkearakeisessa muutosvyöhykkeessä tai karkearakeisessa alueessa hitsiaineessa. Hienorakeisissa vyöhykkeissä kehittyneet säröt vaativat huomattavasti suuremman energian murtumisen etenemiseen, mikä selittää eräiden koekappaleiden suuremman murtumissitkeyden. (Akselsen et al. 2011, s. 416, 419)

### 6.1.3 $R_e = 460$ MPa

Brozda et al. (2000) tutkivat S460ML-teräksen hitsattavuutta sekä hitsausliitoksen ominaisuuksia ja mikrorakennetta. Tutkimuksissa selvitettiin puhtaan perusaineen, hitsattujen kappaleiden ja hitsaussimuloitujen kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. Materiaalina käytet-

tiin saksalaisen Salzgitterin toimittamia 40 mm paksuja levyjä. Taulukossa 13 on esitetty käytetyn S460ML-teräksen kemiallinen koostumus sekä hiilikvivalentti CE. Vetokokeiden perusteella saatiin materiaalin myötölujuudeksi 492 MPa ja murtolujuudeksi 595 MPa sekä murtovenymäksi 30,8 %. Charpy V -iskukokeissa saatiin perusaineelle korkeita iskuenergian arvoja erittäin mataliin lämpötiloihin saakka. Iskusitkeydeksi saatiin yli 200 J lämpötilassa -60 °C valssaussuunnasta riippumatta ja vielä lämpötilassa -85 °C iskusitkeys oli 196 J pitkittäin ja 145 J poikittain valssaussuuntaan nähden. Perusaineen nollasitkeys lämpötilaksi määritettiin Pellinin DWT-kokeen perusteella -65 °C, jonka yläpuolella haurasta murtumaa ei esiintynyt. CTOD-arvot ylittivät 0,2 mm jopa lämpötilassa -75 °C. (Brozda et al. 2000, s. 594–595, 601)

Taulukko 13. Tutkimuksissa käytetyn teräksen S460ML kemiallinen koostumus sekä hiilikvivalentti (Brozda et al. 2000, s. 594)

C	Mn	Si	P	S	Al	Mo	Ni	V	Cr	CE
0,115	1,550	0,370	0,014	< 0,010	0,031	0,002	0,030	0,050	0,038	0,393

Tutkimuksissa selvitettiin Gleeble-kokeella simuloitujen lämpösykliä ( $T_{\max} = 1250$  °C) avulla jäähtymisajan vaikutusta muutosvyöhykkeen ominaisuuksiin. Jäähtymisajan ollessa alle sekunti mikrorakenne oli pääosin martensiittinen kovuuden ollessa noin 374 HV10. Pidemmällä jäähtymisajoilla mikrorakenteeseen muodostui bainiittia ja yli 30 sekunnin jäähtymisajoilla lisäksi ferriittia. Samalla kovuusarvot laskivat lähelle perusaineen kovuutta, noin arvoon 200 HV10. Iskuenergia laski huomattavasti perusaineen arvoista, mutta säilyi silti suhteellisen korkeana jäähtymisaikaan  $t_{8/5} = 60$  s saakka. Jäähtymisajalla  $t_{8/5} = 24$  s iskuenergia ylitti 250 J, mutta hitaammilla jäähtymisajoilla  $t_{8/5} = 120$  s ja  $t_{8/5} = 300$  s iskuenergia laski arvoon 58 J ja 41 J vastaavasti. Käytännön sovelluksissa jäähtymisaika ei kuitenkaan yleensä ylitä 60 sekuntia, mistä johtuen iskuenergian heikkeneminen ei ole suuri ongelma. Lisäksi hitsatuissa kappaleissa saavutettiin huomattavasti korkeampia iskusitkeyden arvoja kuin simuloituissa kappaleissa. (Brozda et al. 2000, s. 595–596, 602)

Hitsauskokeissa käytettiin sekä jauhekaarihitsausta että MAG-hitsausta. Alustavissa kokeissa testattiin useita hitsausjauheita ja -lankoja. Lopulliset hitsauskokeet suoritettiin taulukossa 14 ilmoitetuilla Multimetin lisäaineilla ja hitsausparametreilla. Jauhekaarihitsauksessa käytettiin lisäainetta IMT 7 (0,07 % C, 0,08 % Si, 0,45 % Mn) ja MAG-hitsauksessa lisäainetta IMT 2 (0,08 % C, 0,01 % Si, 0,04 % Mn). Jauhekaarihitsauksessa käytetty jauhe FF75 oli Fersabin valmistama pii-mangaani-pohjainen sintrattu jauhe. MAG-hitsaus suoritettiin kahdella eri hitsausenergialla. Hitsausliitosten myötö- ja murtolujuus sekä murtovenymä olivat samaa

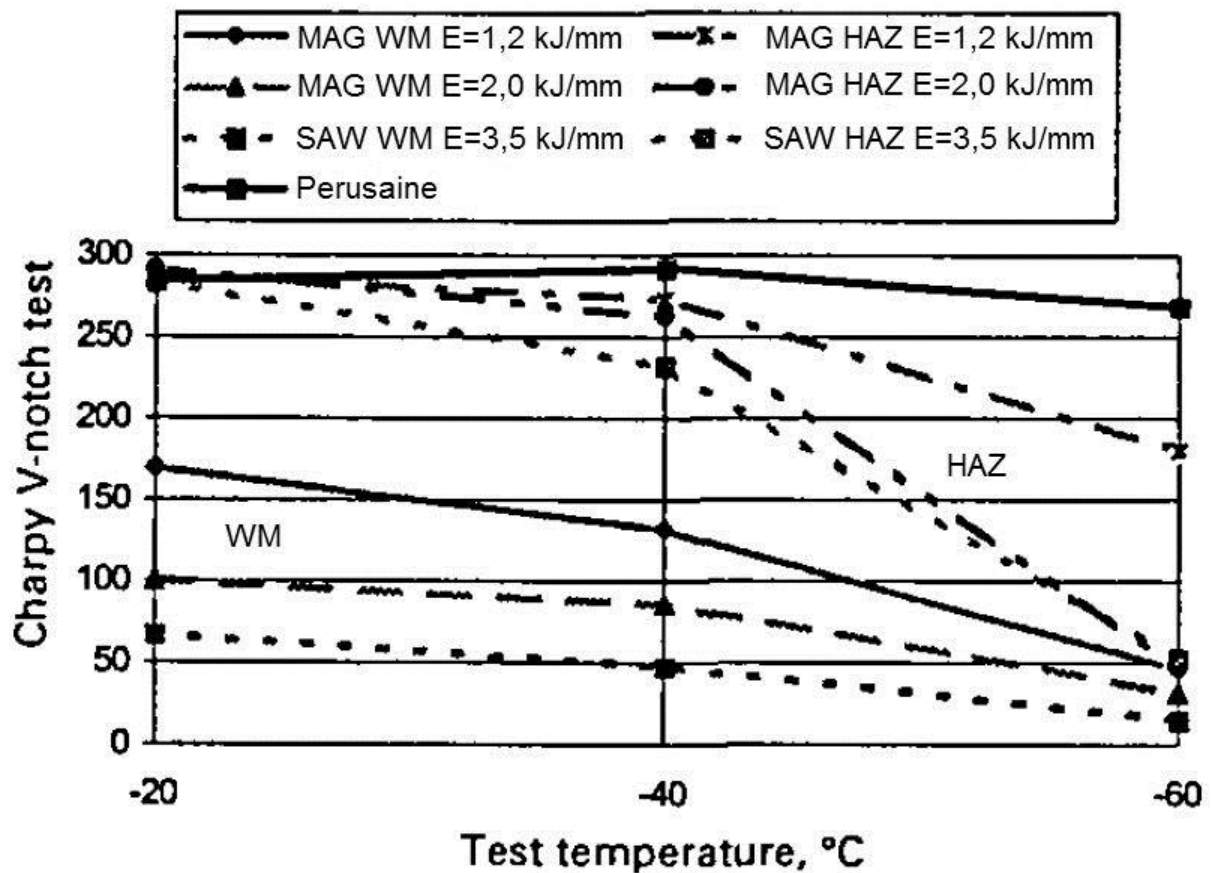
luokkaa kuin perusaineessa. Muutosvyöhykkeen iskusitkeys ylitti 230 J lämpötilassa -40 °C riippumatta lämmöntuonnin arvosta, mutta lämpötilassa -60 °C hitsausenergialla 1,2 kJ/mm hitsatussa MAG-hitsissä saavutettiin huomattavasti muita hitsausenergian arvoja korkeampi iskusitkeys. Muutosvyöhykkeessä kaikki iskusitkeyden arvot ylittivät kuitenkin 50 J. Hitsiaineen iskusitkeys oli puolestaan merkittävästi alhaisempi, alle 100 J lämpötilassa -40 °C ja alle 50 J lämpötilassa -60 °C hitsausprosessista tai -energiasta riippumatta. Hitsiaineen suurin kovuus oli 266 HV10 ja muutosvyöhykkeen 273 HV10. CTOD-kokeissa saatiin muutosvyöhykkeessä huomattavasti korkeampia arvoja kuin hitsiaineessa. MAG-hitseissä CTOD-arvot olivat jauhekaarititsejä korkeammat ja ylittivät 0,2 mm vielä lämpötilassa -60 °C. Taulukossa 15 on esitetty puhtaan S460ML-teräksen sekä hitsiaineiden mekaanisia ominaisuuksia ja kuvassa 29 iskusitkeyden arvoja lämpötilan funktiona eri prosesseilla ja hitsausenergioilla. (Brozda et al. 2000, s. 598–600, 603–604)

Taulukko 14. Hitsauskokeiden lisäaineita ja parametreja (Brozda et al. 2000, s. 599)

Prosessi	Lisäainelanka	Lisäainejauhe	Suojakaasu	I [A]	U [V]	v [cm/min]	E [kJ/mm]
Jauhekaari	IMT 7 ( $\varnothing$ 5 mm)	FF75	-	820 $\pm$ 10	32 $\pm$ 1,5	43...48	3,5
MAG	IMT 2 ( $\varnothing$ 1,2 mm)	-	60 % Ar 30 % He 10 % CO <sub>2</sub>	300 $\pm$ 20	34 $\pm$ 1,0	30	1,2 / 2,0

Taulukko 15. S460ML-teräksen ja sen hitsiaineen mekaanisia ominaisuuksia (Brozda et al. 2000, s. 595, 598, 600, 603–604)

Prosessi	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	K <sub>v</sub> @ -40 °C [J]	$\delta$ @ -40 °C [mm]	$\delta$ @ -60 °C [mm]
Perusaine	492	595	290	0,830	0,738
Jauhekaari (E = 3,5 kJ/mm)	467	596	47	0,153	0,120
MAG (E = 2,0 kJ/mm)	478	589	86	0,375	0,251
MAG (E = 1,2 kJ/mm)	481	599	130	1,048 @ -30 °C	0,256



Kuva 29. S460ML-teräksen iskuenergioita lämpötilan funktiona (Brozda et al. 2000, s. 600)

## 6.2 Putkiteräkset

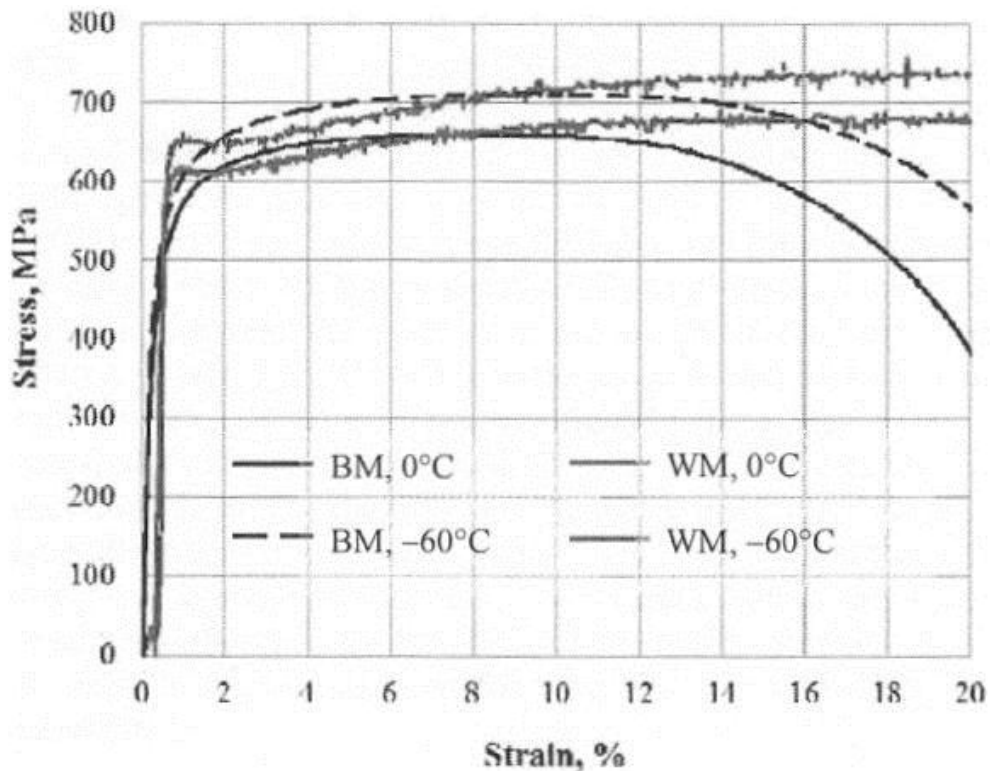
Akselsen et al. (2012) tutkivat API X80 putkiteräksen ( $R_e = 555$  MPa) mekaanisia ominaisuuksia  $-60$  °C:n lämpötilassa. Tutkimuksissa käytettiin sekä MAG-hitsattuja että hitsaussimuloituja kappaleita, joista selvitettiin vetolujuuden, iskutikkeyden, murtumissitkeyden sekä kovuuden arvoja. Käytetty materiaali oli API X80 putkiteräs, jossa putken halkaisija oli 42 tuumaa ja seinämäpaksuus 27,7 mm. Taulukossa 16 on esitetty teräksen kemiallinen koostumus sekä  $P_{cm}$ -arvo. Koekappaleissa juuripalot hitsattiin MAG-hitsauksena ja täyttöpaloit pulssi-MAG-prosessilla. Lisäaineena käytettiin mangaaniseosteista AWS ER 70S-6 lankaa. Hitsauksessa käytettiin aina vähintään  $75$  °C:n esilämmitystä. Suojakaasu vaihteli hitsauspalkojen mukaan. (Akselsen et al. 2012, s. 283–284)

Taulukko 16. API X80 putkiteräksen kemiallinen koostumus (Akselsen et al. 2012, s. 283)

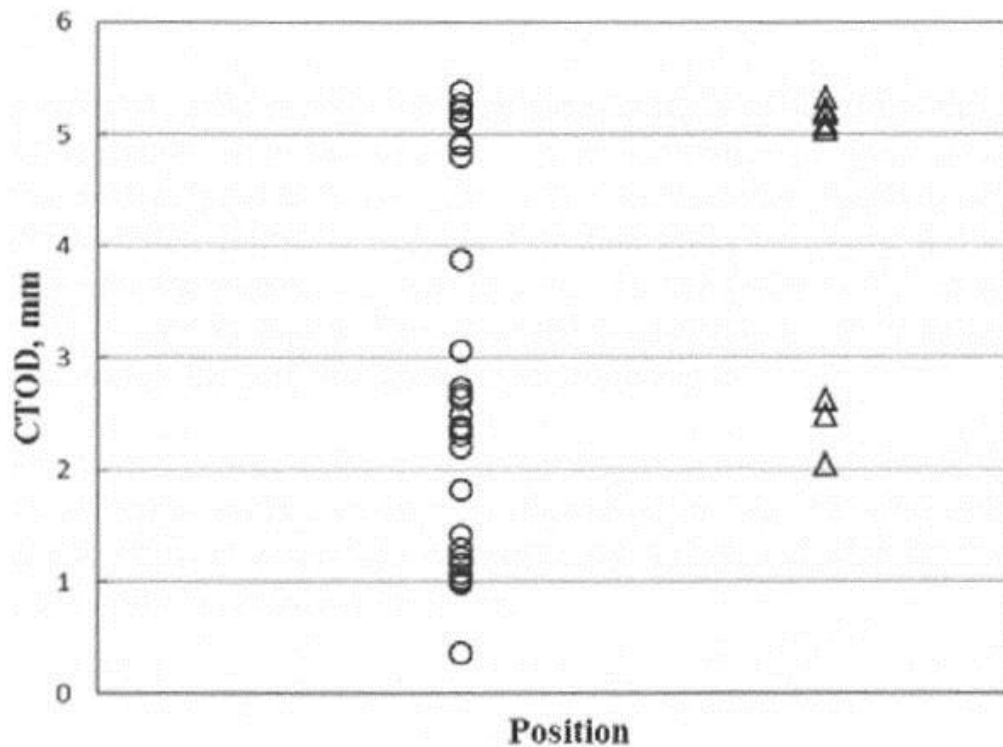
C	Si	Mn	P	S	Muut	$P_{cm}$
0,07	0,04	1,61	0,006	0,001	Ni, Cr, Mo, Nb, Ti	0,17

Iskusitkeysarvot mitattiin hitsaussimuloiduista kappaleista valmistetuista Charpy V-koekappaleista. Koekappaleet olivat standardin mukaisia  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$  kappaleita. Kokeissa saatiin erittäin vaihtelevia tuloksia, iskusitkeyden vaihdella välillä 20..200 J. Keskimääräinen iskusitkeys muutosvyöhykkeen karkearakeisella alueella oli 50...100 J, jäähtymisajan vaihdella välillä 5...15 s. Osittain austenoituneella vyöhykkeellä iskusitkeys jäi kuitenkin alle 30 J:n, mikä kuvastaa haurasta aluetta. (Akselsen et al. 2012, s. 286)

Vetokokeissa saatiin samankaltaisia tuloksia sekä perusaineelle että hitsiaineelle, hitsiaineen myötölujuuden ollessa hieman perusainetta korkeampi. Kuvassa 30 on esitetty jännitys-venymä-piirros ja kuvassa 31 mitatut CTOD-arvot ( $\circ$  = sularaja ja  $\Delta$  = hitsiaine). Sularajalta tehtiin 30 koetta ja hitsiaineesta 10 koetta, joista saatiin pääsääntöisesti korkeita arvoja. Kuten iskusitkeyden arvoissa, myös murtumissitkeyden arvoissa esiintyi huomattavaa vaihtelua, erityisesti sularajalla. Matalin CTOD-arvo, 0,3 mm, esiintyi sularajalla, mutta suuren vaihtelun johdosta korkeimmat arvot olivat yli 5 mm. Hitsiaineessa arvot vaihtelivat välillä 2...5,5 mm. Sularajan arvojen hajonnan arvellaan johtuneen koekappaleiden jännitysmurtumista, jotka etenivät vaihtoehtoisesti joko sularajaa tai perusainetta kohti vaikuttaen huomattavasti murtumiskäyttäytymiseen. (Akselsen et al. 2012, s. 285)



Kuva 30. Jännitys-venymä-piirros putkiteräkselle API X80 (Akselsen et al. 2012, s. 285)

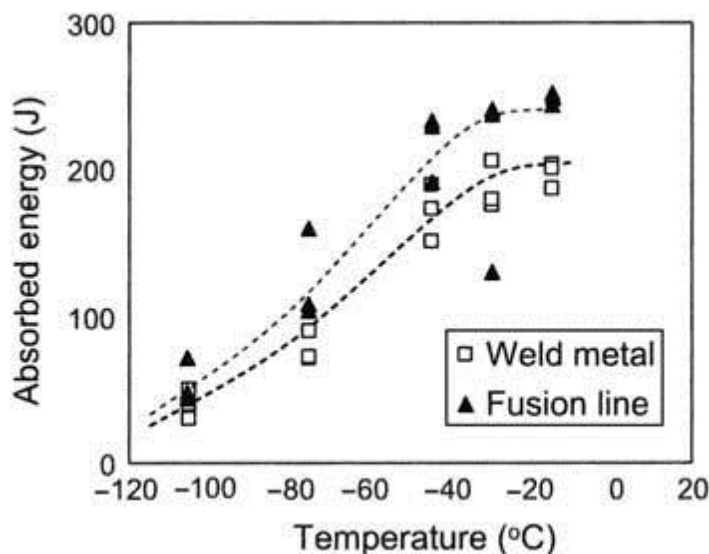


Kuva 31. Mitattuja CTOD-arvoja lämpötilassa  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  putkiteräkselle API X80. ( $\circ$  = sularaja ja  $\Delta$  = hitsiaine) (Akselsen et al. 2012, s. 285)

Ishikawa (2011) tutki API X100 putkiteräksen ( $R_e = 690\text{ MPa}$ ) sitkeysominaisuuksia tandem-MAG-hitsausprosessilla. Tutkimuksissa hitsattiin API X100 putkiterästä tandem-MAG-prosessilla pulssihitsauksena. Työlämpötila oli hitsipalosta riippuen  $100\text{...}135\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja lämmöntuonti  $0,28\text{...}0,45\text{ kJ/mm}$ . API X100 putkiteräksen kemiallinen koostumus ja  $P_{cm}$  ovat esitetty taulukossa 17. Hitsiaineen lujuusarvot ylittivät perusaineen lujuuden ja myös sitkeysarvot olivat suhteellisen korkeat. Charpy V iskukokeiden tulokset on esitetty kuvassa 32, josta havaitaan iskusitkeyden säilyvän suhteellisen korkeana vielä lämpötilassa  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  sekä hitsiaineessa että sularajalla. CTOD-kokeista saatiin lämpötilassa  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  hitsiaineen keskimääräiseksi arvoksi  $0,157\text{ mm}$  ja sularajalla  $0,283\text{ mm}$ . (Ishikawa 2011, s. 658, 660)

Taulukko 17. Tutkimuksissa käytetyn API X100 putkiteräksen kemiallinen koostumus (Ishikawa 2011, s. 659)

C	Si	Mn	Mo	Muut	$P_{cm}$
0,07	0,10	1,85	0,20	Cu, Ni, Nb, Ti	0,20



Kuva 32. API X100 putkiteräksen Charpy V -iskukokeiden tuloksia (Ishikawa 2011, s. 660)

## 7 SOVELLUSKOHTEET

Offshore-rakenteet ovat yksi suurimmista sovelluskohteista arktisilla alueilla. Vuonna 2010 julkaistu standardi ISO 19906 "Arctic Offshore Structures" täydentää vanhempia offshore-rakenteiden suunnitteluun liittyviä standardeja. Yleisin käytetty standardi on EN 10025, joka määrittelee hitsattavia teräksiä offshore-rakenteisiin. Hitsauksen kannalta standardeissa kuitenkin annetaan ohjeita ainoastaan lämpötilaan -40 °C saakka. Useissa projekteissa, kuten Kashagan ja Sakhalin, terästoimittajat ovat kehittäneet uusia teräslaatuja vastaamaan äärimmäisiä vaatimuksia. Teräslaadut -60 °C:n lämpötilaan ovat kuitenkin vasta kehitysvaiheessa. (Hauge 2012, s. 279)

### 7.1 Shtokman

Shtokmanin kaasukenttä sijaitsee Barentsin merellä Murmanskin ja Novaja Zemljan välissä noin 600 kilometriä Kuolan rannikolta (kuva 33). Kaasukentän omistaa venäläinen Gazprom, joka on suunnitellut kentän lopulliseksi kooksi 1400 km<sup>2</sup>. Kaiken kaikkiaan kentälle tarvitaan useita kymmeniä porauslauttoja (kuva 34), joista ensimmäiset valmistettiin osittain Venäjällä, Suomessa ja Koreassa. Ensimmäisessä projektissa valmistetut lautat olivat kahdella ponttonilla varustettuja puoliuppolauttoja, jotka pystyivät toimimaan joko porauslauttoina tai kelluvina tuotantolauttoina. Suomessa valmistetut pääjalkojen tukirakenteet toimitti Venäjälle Oy SteelDone Group Ltd., joka edustaa viittä pohjoissuomalaista metallialan yritystä. Jalkarakenteet olivat kooltaan 118x70x40 metriä ja painoivat 15 000 tonnia. Rakenteet toimitettiin Viipurin telakalle, jossa lautat valmistettiin. Materiaalien hitsattavuudelle ja hitsausliitoksille oli

projekissa asetettu erittäin tiukat vaatimukset, käyttökohteen sijaitessa Pohjoisella Jäämerellä. Käytetty teräs oli venäläisen merirekisterin mukaista F36 TM laivanrakennusterästä levyypaksuusluokassa 20...60 mm. Kyseiselle teräkselle tyypillinen hiilikvivalentti on 0,35, mikä takaa erinomaisen hitsattavuuden ja vähäisen esikuumennustarpeen. Projektissa yli 50 mm paksut rakenteet esikuumennetaan vastuksilla tai kaasupolttimilla 75 °C:een. F36 laivanrakennusteräksen vaatimukset Venäläisen merirekisterin mukaan on esitetty taulukossa 18. (Lukkari 2010a, s. 6–8)



Kuva 33. Alaskan rannikolla sekä Barentsin merellä sijaitsee useita öljy- ja kaasuesiintymiä (Schiermeier 2012, s. 14)





Kuva 34. Shtokmanin kaasukentälle valmistettavan porauslautan runko (Lukkari 2010b, s. 16)

Taulukko 18. F36 laivanrakennusteräksen vaatimukset venäläisen merirekisterin mukaan (Lukkari 2010a, s. 8)

Nimike	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	$K_V$ [J] pitkittäin (-60 °C)	$K_V$ [J] poikittain (-60 °C)
F 36 TM	355	490...620	$\geq 21$	s < 50 mm: 34 50 < s < 70 mm: 41	s < 50 mm: 24 50 < s < 70 mm: 27

Materiaalille suoritettiin sekä Charpy- että CTOD-kokeita. Rakenteet kuuluvat merirekisterin mukaan vaativimpaan rakenneluokkaan eli erikoisrakenteisiin, joihin kohdistuu jään, tuulen ja aaltojen syklisiä kuormituksia sekä seismisiä kuormituksia. Myötölujuusluokan 355 MPa teräkselle levynpaksuudella 50...70 mm CTOD-vaatimus projektissa oli vähintään 0,25 mm, joka saavutettiin kokeissa lämpötilassa -30 °C. Myös iskukokeissa saatiin pääsääntöisesti yli 100 J:n iskuenergian arvoja, muutosvyöhykkeessä jopa yli 200 J. Hitsauksessa käytettiin pääosin jauhekaarihitsausta ja lisäaineiksi valittiin vaatimusten perusteella OK Tubrod 15.25S sekä OK Flux 10.62. Näillä lisäaineilla saavutettava tyypillinen hitsiaineen kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 19. (Lukkari 2010a, s. 8–9)

Taulukko 19. OK Tubrod 15.25S + OK Flux 10.62 lisäaineyhdistelmällä saavutettava hitsiaineen kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet (Lukkari 2010a, s. 8)

AWS A5.23	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Ni [%]	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	K <sub>V</sub> [J] (-60 °C)
F7A8-EC-Ni2	0,06	0,3	1,3	2,2	492	581	29	96

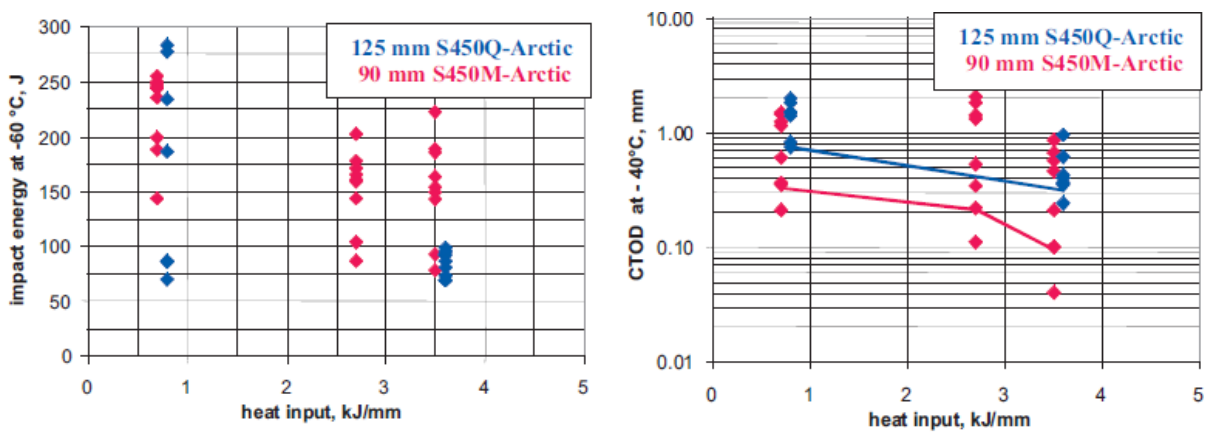
## 7.2 Sakhalin-2

Sahalin-2-projekti sisältää sekä öljyn- että kaasuntuotantoa Venäjän Sakhalinin alueella Oho-tanmerellä. Alueeseen kuuluu sekä Piltun-Astokhskoye-öljykenttä että Luns koye-kaasukenttä (kuva 35). Projektin tuloksena on esimerkiksi Venäjän ensimmäinen nestemäisen maakaasun tuotantolaitos, joka avattiin helmikuussa 2009. Sekä öljy- että maakaasutuotannossa käytetään nelipilarisia porauslauttoja. Saksalainen Dillinger Hütte GTS toimitti teräskomponentteja lautojen päällirakenteisiin ja runkoihin sekä betonisten perustusten rakenteisiin. Alueen ankaran ilmaston vuoksi rakenteisiin jouduttiin kehittämään uusi erikoisteräs S450-Arctic, jota projektiin toimitettiin yli 10 000 tonnia levynpaksuusluokassa 15...150 mm. Levyt valmistettiin pääosin termomekaanisesti valssaamalla ja ainoastaan paksuimmat levyt olivat nuorrutettuja. Kehitetty teräs on erittäin matalahiillistä niobiseosteista terästä, jonka P<sub>cm</sub>-arvo on noin 0,17. Teräkseltä vaadittiin 60 J:n iskuenergiaa -60 °C:ssa sekä hyväksyttävää arvoa CTOD-kokeessa lämpötilassa -40 °C. Kuvassa 36 on esitetty sekä M-teräksen että nuorrutetun teräksen hitsattujen rakenteiden iskukokeiden ja CTOD-kokeiden tulokset lämmöntuonnin funktiona. Kappaleet hitsattiin joko MAG-täytelangalla (0,7 kJ/mm) tai jauhekaarella (2,7 ja 3,5 kJ/mm). (Gazproz Sakhalin Holding B.V; Schütz & Hanus 2005)

Osana projektia rakennettiin myös öljyn ja maakaasun kuljetusjärjestelmä, joka käsittää yhteensä 1900 km putkilinjaa. Maalla oleva putkilinja käsittää yhteensä 1600 km putkea ja merellä oleva 300 km. Putkilinjan käytettyjen putkien halkaisijat vaihtelevat välillä 14...48 tuumaa ja seinämäpaksuudet välillä 7,1...30,2 mm. Materiaaleina käytettiin API-standardin mukaisia putkia vahvuuksilla X52, X60, X65 ja X70. (Constructing Sakhalin Island's pipeline network)



Kuva 35. Sakhalin-2-projektin Lunskeye-A maakaasulautta (Gazproz Sakhalin Holding B.V)



Kuva 36. Dillinger Hütten S450-Arctic terästen iskukokeiden ja CTOD-kokeiden arvot lämmöntuonnin funktiona (Schütz & Hanus 2005)

### 7.3 Fesco Sakhalin

STX European Helsingin telakalla valmistui vuonna 2005 Sakhalinin kentälle tarkoitettu huoltoalus Fesco Sakhalin (kuva 37). Aluksen tilaaja oli venäläinen Far Eastern Shipping Com-

pany (Fesco), ja käyttäjä ExxonMobil, joka käyttää alusta Sahalinin öljy- ja maakaasukentällä huoltoaluksena ja jäänmurtajana. Alus pystyy lisäksi murtamaan 1,5 metriä paksua jäätä. Jäätä murtaessaan alus voi kulkea normaalisti eteenpäin, mutta sillä voidaan murtaa jäätä myös peruuttamalla. Aluksen materiaaleina on käytetty useaa eri laivanrakennusterästä. Rungon ulkolaita ja siihen hitsattavat profiilit ovat lujaa termomekaanisesti valssattua E500-laivanrakennusterästä. Rungon sisäosat on valmistettu teräslaadusta E40 ja E36 sekä osittain laadusta A36. E-luokan laivanrakennusteräkselle on taattu sitkeysominaisuudet lämpötilaan  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  asti. Kaiken kaikkiaan aluksessa on noin puolet E500-terästä, noin 2000 tonnia, kokonaispainon ollessa 3950 tonnia. Käytettyjen lujien terästen hiilikvivalentti on alle 0,40, mikä takaa erinomaisen hitsattavuuden sekä vähäisen esikuumennustarpeen. Esikuumennusta joudutaan käyttämään yli 40 mm paksuilla levyillä. (Lukkari 2005, s 4-5)



Kuva 37. Sakhalinin kentälle toimitettu Fesco Sakhalin jäätä murtava huoltoalus (Aker Arctic)

Hitsauslisäaineina käytettiin ESABin toimittamia 36- ja 500-lujuusluokan lisäaineita. Lisäaineiden määrä rakenteista on noin 3,5 % eli 70 tonnia. E500-teräksen hitsauksessa käytettiin nikkeliseosteista lisäainetta, (2,3 % Ni), mikä takaa riittävän sitkeyden sekä myös merivesikorroosionkeston. Erityisesti jäissä kulkevilla aluksilla merivesikorroosionkesto on tärkeää, sillä jäät raapivat helposti rungon suojamaalit pois. 500-luokan lisäaineina käytettiin MAG-täytelankahitsauksessa PZ6115-rutiilitäytelankaa, jauhekaarihitsauksessa yhdistelmää OK Autrod 13.27 + OK Flux 10.62 ja puikkohitsauksessa lisäainetta OK 73.68. 36-luokan

teräksen hitsauksessa puolestaan käytettiin MAG-täytelankahitsauksessa sekä rutiililankaa PZ6113 että metallilankaa OK Tubrod 14.12, jauhekaarihitsauksessa yhdistelmää OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71 ja puikkohitsauksessa lisäainetta OK 48.00. 500-luokan lisäaineiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 20. (Lukkari 2005, s. 5)

Taulukko 20. 500 MPa -lujuusluokan hitsauslisäaineet ja puhtaan hitsiaineen tyypilliset lujuusominaisuudet (Lukkari 2005, s. 6)

Lisäaine	EN-luokitus	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	K <sub>v</sub> [J]
PZ6115	T 50 5 2Ni P M 2 H5	560	620	24	60 (-50 °C)
OK Autrod 13.27	S 46 7 FB S2Ni2	490	570	27	90 (-60 °C)
OK 73.68	E 46 6 2Ni B 32 H5	520	610	26	85 (-60 °C)

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Nykyisten terästen sitkeydestä -60 °C:ssa tai alemmassa lämpötilassa ei ole paljon tutkimustuloksia. Tehdyt tutkimukset koskevat pääosin termomekaanisesti valssattuja hienoraeteräksiä sekä putkiteräksiä. Standardin tai valmistajan puolesta materiaalille taattu minimikäyttölämpötila iskuenergian perusteella ei välttämättä kuitenkaan aina ole oikea minimikäyttölämpötila. Esimerkiksi Brozdan et al. (2000) tutkimuksissa S460ML M-teräkselle saatiin jokseenkin korkeampia iskuenergioita kuin mitä standardeissa tai valmistajien puolesta taataan. Niin M-teräksiä kuin putkiteräksiäkin koskevissa tutkimuksissa on pääsääntöisesti saatu vähintään standardien vaatimia sitkeysarvoja lämpötilassa -60 °C ja jopa alemmissa lämpötiloissa.

Tutkimuksissa on kuitenkin saatu suhteellisen vaihtelevia tuloksia materiaalien isku- ja murtumissitkeydestä hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen alueiden välillä. Myös hitsiaineen sisällä sekä sularajan läheisyydessä on havaittu merkittävää hajontaa iskusitkeydessä sekä murtumissitkeydessä. Pääsääntöisesti muutosvyöhykkeen iskusitkeys on havaittu korkeammaksi kuin hitsiaineen, jopa moninkertaiseksi. Erot hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen välillä johtuvat todennäköisesti erilaisen mikrorakenteen syntymisestä.

Myös hitsausprosessilla näyttää olevan huomattava merkitys sitkeyden kannalta. VTT:n tutkimuksissa MAG-hitsauksella ei saatu riittäviä sitkeysarvoja ollenkaan, mutta puikkohitsauksella ja jauhekaarihitsauksella saavutettiin moninkertaisia iskuenergian arvoja verrattuna MAG-hitsaukseen. Lämmöntonuonnilla on myös erittäin paljon vaikutusta. Pääsääntöisesti pienemmällä lämmöntonuonnilla on havaittu korkeampia sitkeyden arvoja, riippumatta hitsauspro-

sessista. Lämmöntuonti vaikuttaa luonnollisesti jäähtymisnopeuteen, mikä puolestaan määrittää syntyvän mikrorakenteen. Suuremmalla hitsausenergialla jäähtymisaika on pidempi, jolloin liitokseen syntyy karkearakaisia ja sälemäisiä esieutektoidisia ferriittirakenteita. Puolestaan nopeammassa jäähtytyksessä syntyvät asikulaariset ferriittirakenteet sekä alabainiitti vaikuttavat positiivisesti liitoksen sitkeyteen. Tämä johtuu kyseisten mikrorakenteiden pienestä raekoosta. VTT:n tutkimusten mukaan noin 70...80 % alabainiittia tai asikulaarista ferriittia tuottaa hyväksyttäviä sitkeysarvoja  $-60\text{ °C}$ :n lämpötilassa normalisoidulla hienoraeteräksellä. Mikrorakenteen lisäksi myös erkaumat vaikuttavat negatiivisesti sitkeyteen. Tosin erkaumia syntyy juuri korkeammilla lämmöntuonneilla enemmän.

Tutkimusten mukaan lisäaineella voidaan vaikuttaa merkittävästi syntyvän hitsin sitkeyteen. Myös tavallisella mangaani-seosteisella lisäaineella voidaan saavuttaa suhteellisen korkeita sitkeyden arvoja, mutta mangaani-pii- tai nikkelseosteiset lisäaineet ovat varmempia valintoja äärimmäisissä olosuhteissa.

Kattavan materiaalistandardin kehittäminen arktisiin olosuhteisiin soveltuvista materiaaleista ( $T \leq -60\text{ °C}$ ) on varmasti eräs potentiaalinen kehityskohde ja joitakin projekteja ja tutkimuksia onkin jo menossa, mutta luotettavan ohjeistuksen tai standardin suunnitteleminen tulee vaatimaan erittäin ekstensiivisiä testejä ja tutkimuksia.

## 9 YHTEENVETO

Diplomityö tehtiin osana Arctic Materials Technologies Development -projektia, joka toteutetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Pietarin PROMETHEY-tutkimuslaitoksen kesken. Projektin tavoitteena on määrittää perusteita ja säännöksiä arktisella alueella käytettävien rakenteiden turvalliseen ja taloudelliseen suunnitteluun sekä valmistukseen. Käytännössä projektissa selvitetään esimerkiksi energia- ja kuljetusteollisuuden tarpeisiin soveltuvia matalan käyttölämpötilan materiaaleja sekä niiden hitsattavuutta. Käyttökohteisiin kuuluu esimerkiksi jäänmurtajia, öljynporaustaluttoja ja putkilinjoja. Arktinen alue on saanut paljon huomiota potentiaalisten öljy- ja maakaasuesiintymien johdosta, erityisesti lähivuosina ilmastonmuutoksen aiheuttaman merijään heikkenemisen ja sitä myötä meren pohjassa sijaitsevien resurssien taloudellisemman hyödyntämisen kautta. Tutkimusten mukaan jopa 13 % maailman jäljellä olevasta öljystä ja 30 % maakaasusta sijaitsee arktisella alueella. Energiategollisuuden lisäksi myös uudet merireitit ovat herättäneet kiinnostusta, erityisesti Atlantin ja Tyynen valtameren välinen Koillisväylä. Jatkuva merijään heikkeneminen saattaa mahdollistaa lisäksi merikuljetukset myös pohjoisnavan ylitse.

Arktisten alueiden rakenteiden materiaalivaatimukset ovat huomattavasti tiukemmat kuin tavallisissa olosuhteissa. Merkittävin asia on luonnollisesti matala lämpötila, joka saattaa olla  $-60\text{ °C}$  alueittain. Lisäksi merivesi, lumi, jää ja tuuli aiheuttavat huomattavia ja vaihtelevia kuormituksia niin sisämaan sovelluksissa kuin offshore-rakenteissakin. Yksi erittäin tärkeä asia on lisäksi arktisen luonnon haavoittuvuus sekä kohteiden väliset suuret välimatkat ja infrastruktuurin puute. Rakenteiden suunnittelussa tulee ottaa kaikki vaikuttavat seikat huomioon, sillä mahdollisessa vauriotapauksessa sekä poliittiset että taloudelliset riskit voivat nousta erittäin suuriksi.

Äärimmäisissä olosuhteissa materiaaleilta vaaditaan korkeampia mekaanisia ominaisuuksia, kuin tavanomaisissa sovelluskohteissa. Tästä johtuen useissa arktisten olosuhteiden käyttökohteissa hyödynnetään lujia teräksiä. Lujiin hitsattaviin teräsiin kuuluvat lujuusluokan puolesta teräkset, jotka sijoittuvat myötölujuudeltaan alueelle 355...700 MPa. Korkeampien sitkeysvaatimusten ja hyvän hitsattavuuden johdosta käytettävät materiaalit ovat pääsääntöisesti mikroseosteisia hienoraeteräksiä. Tähän määritelmään kuuluvat mikroseostetut, hienorakeiset normalisoidut ja termomekaanisesti valssatut sekä myös niukkaseosteiset nuorrutusteräkset. Mikrorakenteen perusteella soveltuvimpia ovat asikulaariset ferriittiset sekä bainiittiset teräkset. Niiden sitkeysominaisuudet ovat huomattavasti korkeammat kuin muita mikrorakenteita sisältävien terästen. Nykyisissä standardeissa ei ole määritelty ns. arktisiin olosuhteisiin soveltuvia teräksiä, mutta sekä normalisoiduille että M-teräksille taataan riittävä sitkeys  $-50\text{ °C}$ :ssa ja niukkaseosteisille nuorrutusteräksille  $-60\text{ °C}$ :ssa.

Suuri osa jo käytössä olevista sekä rakenteilla olevista kohteista hyödyntää ferriittisiä rakenneteräksiä. Ferriittisten terästen etuna ovat niiden taloudellisuus ja korkeat lujuusominaisuudet, mutta ne ovat myös alttiita lämpötilasta riippuvalle transitiokäyttäytymiselle. Käytännössä teräksen sitkeysominaisuudet heikkenevät voimakkaasti lämpötilan laskiessa, ja jo  $0\text{ °C}$  saattaa aiheuttaa rakenteen murtumisen, jos käyttöolosuhteita ei ole otettu tarkasti huomioon. Lämpötilan laskiessa materiaalin sitkeys heikkenee ja haurasmurtuman vaara kasvaa. Transitiolämpötila määritellään esimerkiksi iskukokeiden arvojen avulla tai sitkeän murtuman osuuden avulla. Teräksen sitkeyteen ja haurasmurtuman etenemiseen vaikuttavat useat asiat, kuten seostus, mikrorakenne, kuormitus, lämpötila, jännitykset, kuormitusnopeus sekä särömäiset alkuviat. Teräksen sitkeyttä ja murtumiskestävyyttä voidaan mitata monella tavalla, yleisimpinä Charpy V -iskukokeet sekä CTOD-arvoa mittaavat menetelmät. Käytännössä haurasmurtumariskin ollessa yksi suunnittelukriteereistä, tulee materiaalivalinta ja rakennesuunnittelu suorittaa murtumissitkeyden pohjalta toisin kuin normaalisti lujuusominaisuuksien pohjalta.

Matalan käyttölämpötilan sovelluksissa tulee luonnollisesti ottaa materiaalivalinnan ja suunnittelun lisäksi valmistukselliset seikat huomioon. Esimerkiksi hitsauksen kannalta oleellisia asioita ovat itse hitsauksen suoritus hitsaajan toimintakyvyn kannalta, lämmöntuonti ja korotettu työlämpötila, jäähtymisnopeudet, vetyhalkeilutaipumus sekä hitsausprosessin ja oikeiden lisäaineiden valinta. Mekanisoidulla hitsauksella saavutetaan yleisesti ottaen parempia iskusitkeyden arvoja kuin käsinhitsauksella. Suurtehoprosessit soveltuvat myös erinomaisesti matalien käyttölämpötilojen sovelluksiin. Korotettu työlämpötila sekä esikuumennus ovat erinomaisen tärkeitä muuttujia hitsilaadun sekä vetyhalkeilun kannalta. Vetyhalkeilua ja hitsin transitiokäyttäytymistä voidaan parantaa lisäksi sopivalla lisäaineella, kuten mangaani-piiseosteisella tai, erittäin vaativissa olosuhteissa, nikkelseosteisella lisäaineella.

Nykyisten terästen sitkeydestä  $-60\text{ °C}$ :ssa tai alemmassa lämpötilassa ei ole paljon tutkimustuloksia. Pääsääntöisesti kuitenkin materiaalille taattu minimikäyttölämpötila iskuenergian perusteella ei välttämättä ole oikea minimikäyttölämpötila. Tutkimuksissa on saatu vaihtelevia tuloksia materiaalien isku- ja murtumissitkeydestä matalissa lämpötiloissa. Myös sitkeysominaisuudet hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen alueiden välillä ovat vaihtelevia. Pääsääntöisesti muutosvyöhykkeen iskusitkeydet ovat korkeampia kuin hitsiaineen. Sitkeyden kannalta edullisia mikrorakenteita ovat bainiitti sekä asikulaarinen ferriitti niiden pienen raekoon johdosta. Luotettavan ohjeistuksen tai kattavan standardin suunnittelemiseen vaatisi ekstensiivisiä testejä useista eri materiaaleista. Tyypillisiä käyttökohteita lujille hitsattaville hienoraeteräksille ovat esimerkiksi öljynporauslautat, putkilinjat sekä jäänmurtajien kansirakenteet. Erittäin Venäjän rannikoille Barentsin merelle ja Sakhalinin alueelle on rakennettu, ja tullaan tulevaisuudessa rakentamaan, useita öljy- ja kaasukenttien hyödyntämiseen tarkoitettuja rakenteita.



## LÄHTEET

Aker Arctic. *Icebreaking supply and standby vessel Fesco Sakhalin*. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.12.2012]. Saatavissa:

<http://www.akerarctic.fi/publications/pdf/aker%20arc%20101.pdf>

Akselsen, O.M., Østby, E. & Nyhus, B. (2012) Low temperature fracture toughness of X80 girth welds, teoksessa: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> international offshore and polar engineering conference* in Rhodes. Vol. 4. Cupertino, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, s. 283–289.

Akselsen, O.M., Østby, E. & Thaulow, C. (2011) Low temperature toughness in SA welding of 420 MPa steel, teoksessa: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> international offshore and polar engineering conference* in Maui, Hawaii. Vol. 4. Cupertino, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, s. 414–420.

Anderson, T.L. (2005) *Fracture mechanic: fundamentals and applications*. 3. painos. Boca Raton, FL: CRC Press.

Black, J.T. & Kohser, R. A. (2008) *DeGarmo's materials and processes in manufacturing*. 10. painos. John Wiley & Sons, Inc.

Brozda, J., Zeman, M. & Lomozik, M. (2000) The weldability of thermomechanically rolled S460ML steel. *Welding international*. Vol. 14, no. 8, s. 593-605.

Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. (2011) *Materials science and engineering*. 8. painos. John Wiley & Sons, Inc.

Constructing Sakhalin Island's pipeline network. (2010) *Pipelines international*. No. 3, s. 31–33.

Davis, J.R. (toim.) (2001) *Alloying: understanding the basics*. Materials Park, OH: ASM International.

Gazprom Sakhalin Holding B.V. *Sakhalin II — Russia's First LNG Project*. [online]. [viitattu 31.7.2012]. Saatavissa: <http://www.gazprom-sh.nl/sakhalin-2/>

Hauge, M. (2012) Arctic offshore materials and platform winterisation, teoksessa: *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> international offshore and polar engineering conference* in Rhodes. Vol. 4. Cupertino, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, s. 278–282.

Herring, D.H. (2010) Toughness. *Industrial heating* [verkkolehti]. Nro 12. [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa: <http://digital.bnppmedia.com/publication/?i=54546>

Huhdankoski, E. (2000) *Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa*. 2. painos. Keuruu: Otava.

Härkönen, T. & Tervola, T. (1993) *Lujat hitsattavat teräkset*. Tekninen tiedotus 1/93. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Ikonen, K. & Kantola, K. (1986) *Murtumismekaniikka*. Helsinki: Otakustantamo.

Ishikawa, N. (2011) Ultra-high-strength linepipe X100–X120. *Welding international*. Vol. 25, no. 9, s. 657–662.

Kivivuori, S. & Härkönen, S. (2004) *Lämpökäsittelyoppi*. Helsinki: Teknologainfo Teknova Oy.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski J. (2010) *Kone-tekniikan materiaalioppi*. 13. painos. Helsinki: Edita Prima Oy

Lausala, T. & Jumppanen, P. (2002) *Arktinen teknologia suomalaisten yritysten liiketoimintastrategioissa*. Teknologia katsaus 128/2002. Helsinki: Tekes.

Layus, P. (2012) *Russian metals for Arctic offshore structures*. Master`s Thesis. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.

Lepola, P. & Makkonen, M. (2006) *Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet*. 2. painos. Helsinki: WSOY.

Lukkari, J. (2005) ...ja hitsataanhan jäänmurtajakin! *Hitsausuutiset*. No. 1, s. 3–7.

Lukkari, J. (2007) Käytännön hitsausmetallurgiaa, hiilikvivalentti ja esikuumennus hitsauksessa. *Hitsausuutiset*. No. 1, s. 20–24.

Lukkari, J. (2010a) Offshore-rakenteita Barentsin merelle. *Hitsausuutiset*. No. 4, s. 6-10.

Lukkari, J. (2010b) Finnish structures for Stockmann gas field in the Barents Sea. *Svetsaren*. No. 1, s. 16–20.

Lukkari, J. & Vähäkainu, O. (2003) How much heat can various steels and filler metals withstand? *Svetsaren*. No 1, s. 18–23.

MET. (1981) *Materiaalinvalinta: yleisohjeet*. Tekninen tiedotus 22/81 Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

MET. (2001) *Muokatut teräkset*. 3. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy

Meyers, M. & Chawla, K. (2009) *Mechanical behaviour of materials*. 2. painos. Cambridge: Cambridge University Press.

Nevasmaa, P., Toyoda, M., Vilpas, M. & Karppi, R. (1987) *Uudet termomekaanisesti valssatut teräkset, edut ja rajoitukset*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tutkimuksia. No. 760. Espoo: VTT Offsetpaino.

Paasivuori, P. (1991) *Suomalainen kylmän ilmaston rakennustekniikka. Osa 6. Teräsrakentaminen kylmässä ja arktisessa ilmastossa*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tiedotteita. No. 1230. Espoo: VTT Offsetpaino.

Ruukki. *Optim 500 ML rakenneteräkset*. [online]. [viitattu 19.12.2012]. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-500-ML>

Ruukki. (2010) *Developments in hot-rolled high-strength structural steels*. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.12.2012]. Saatavissa: <http://www.ruukki.com/~media/Files/Steel-products/Technical-articles/Ruukki-Technical-article-Developments-in-hot-rolled-high-strength-structural-steels.ashx>

Ruukki. (2011) *Hot-rolled steel plates and coils: Welding and thermal cutting of Raex wear-resistant steels*. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: <http://www.ruukki.com/~media/Files/Steel-products/Ruukki-Hot-rolled-steels-Welding-and-thermal-cutting-of-Raex.ashx>

Salmi, T. & Virtanen, S. (2008) *Materiaalien mekaniikka*. Tampere: Pressus Oy.

Samuelsson, A. & Schröter, F. (2005) High-performance steels in Europe: production processes, mechanical and chemical properties, fabrication properties, teoksessa: Günther H.-P. (toim.) *Use and application of high-performance steels for steel structures*. Structural engineering documents. No. 8, s. 99–110. Zürich: International Association for Bridge and Structural Engineering.

Schiermeier, Q. (2012) The great Arctic oil race begins. *Nature*. Vol. 482, no. 7383, s. 13–14.

Schütz, W. & Hanus, F. (2005) New steels for Arctic regions: Sakhalin II, a challenging project. *Dillinger offshore letter* [verkkolehti]. Nro. 1 [viitattu 31.7.2012]. Saatavissa [www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/offshore/technischeliteratur/offshore\\_letter\\_1\\_2005.pdf](http://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/offshore/technischeliteratur/offshore_letter_1_2005.pdf)

Seppälä, E. (1998) *Hitsaajan käsikirja*. 5. Painos. Tampere: Impomet Oy.

SFS-EN 1011-2. (2001) *Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 10025-1. (2004) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 10025-2. (2004) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 10025-3 (2004) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 3: Normalisoidut ja normalisointivalssatut hitsattavat hienoraerakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 10025-4 (2005) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 4: Termomekaanisesti valssatut hitsattavat hienoraeteräkset. Tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 10025-6 (2009) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 6: Nuorrutetut lujat rakenneteräslevytuotteet. Tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 10027-1. (2005) *Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN 10028-3. (2009) *Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 3: Normalisoidut hitsattavat hienoraeteräkset*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

SFS-EN ISO 148-1. (2010) *Metallien Charpyn iskukoe. Osa 1: Menetelmä*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. (2009) *Hitsauksen materiaalioppi*. 3. painos. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry.

Tihekari, H. & Karppi, R. (1984) *Mikrorakenteen vaikutus hienoraeteräksen hitsausliitoksen sitkeyteen arktisissa olosuhteissa*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tutkimuksia. No. 261. Espoo: VTT Offsetpaino

Valtioneuvoston kanslia. (2010) *Suomen arktinen strategia*. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja. No. 7. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia.

von Busch, M. (2010) Preheating in welding technology. *nonstop*. No. 02, s. 33–41.

Vähäkainu, O. (1998) *Rautaruukin teräkset, hitsaajan opas*. Keuruu: Otava.

Willms, R. (2009) High strength steel for steel constructions. [verkkodokumentti]. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> nordic steel construction conference* in Malmö, Sweden. S. 597–604. [viitattu 19.12.2012]. Saatavissa: <http://www.nordicsteel2009.se/pdf/132.pdf>