

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

VEDENALAINEN KAARI- JA KITKATAPITUSHITSAUS  
UNDERWATER STUD WELDING AND FRICTION STUD WELDING

Lappeenrannassa 6.9.2012

Ville Aitta

SISÄLLYSLUETTELO  
KÄYTETYT MERKINNÄT

1 JOHDANTO .....	4
2 HITSAUSPROSESSIEN TEORIA .....	5
2.1 Kaaritapitushitsaus nostosytytyksellä .....	7
2.1.1 Tapitushitsaus käyttäen keraamista rengasta tai suojakaasua .....	8
2.1.2 Lyhytjaksokaaritapitushitsaus nostosytytyksellä .....	8
2.1.3 Tapitushitsaus kondensaattoripurkausmenetelmällä ja nostosytytyksellä .....	8
2.2 Kaaritapitushitsaus kärkisytytyksellä.....	9
2.2.1 Kärkisytytytys kontaktilla .....	9
2.2.2 Kärkisytytytys ilmavälillä .....	9
2.3 Kitkahitsaus.....	10
2.3.1 Kitkatapitushitsaus .....	11
3 VEDENALAINEN HITSAUS .....	13
3.1 Märkähitsaus .....	13
3.2 Kuivahitsaus.....	13
3.3 Veden ja paineen vaikutus hitsausliitoksen ominaisuuksiin .....	15
3.4 Valmiit laitteistot vedenalaiseen hitsaukseen.....	18
3.4.1 Vedenalaiseen kaaritapitushitsaukseen soveltuvat laitteistot.....	18
3.4.2 Vedenalaiseen kitkatapitushitsaukseen soveltuvat laitteistot.....	19
4 HITSAUSKOKEET.....	20
4.1 Koejärjestely .....	20
4.2 Koetulokset .....	22
5 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	23
6 YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET .....	25
LIITTEET	

## KÄYTETYT MERKINNÄT

d	Tapin halkaisija [mm]
HAZ	Muutosvyöhyke (Heat Affected Zone)
I	Hitsausvirta [A]
ISO	International Organization for Standardization
L	Tapin nostokorkeus [mm]
P	Ulkonema levyn pinnasta [mm]
ROV	Kauko-ohjattu ajoneuvo (Remote Operated Vehicle)
SFS	Suomen standardisoimisliitto
t	Levyn paksuus [mm]
t <sub>8/5</sub>	Hitsin jäähtymiseen kulunut aika lämpötilavälillä 800...500 °C

## 1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, soveltuvatko kaaritapitushitsausmenetelmät ja kitkatapitushitsaus vedenalaiseen työskentelyyn. Työssä käsitellään sekä märkä- että kuivahitsausta ja selvitetään, onko markkinoilla valmiita vedenalaiseen työskentelyyn tarkoitettuja hitsauslaitteistoja. Työn toimeksiantajaa ja lopullista sovelluskohdetta ei ole lupa mainita, joten asioita käsitellään yleisellä tasolla.

Työ on pääosin kirjallisuusselvitys, ja se sisältää lisäksi kokeellisen osuuden vedenalaisesta kaaritapitushitsauksesta. Kokeelliseen osuuteen kuuluu myös hitsausliitoksen lujuuteen liittyviä testejä ja hitsausliitoksen onnistumisen arviointia makrokuvan perusteella. Koeolosuhteet eivät vastaa täysin käytännön tilannetta, mutta suuntaa antavia johtopäätöksiä kokeiden perusteella voidaan kuitenkin tehdä. Työssä pyritään löytämään mahdollisia ongelmakohtia hitsaukseen liittyen ja tarjoamaan näihin ratkaisuja. Lisäksi työssä pyritään tuomaan esille mihin asioihin mahdollisia jatkotutkimuksia kannattaisi kohdentaa ja mihin asioihin kiinnittää erityistä huomiota.

## 2 HITSAUSPROSESSIEN TEORIA

Standardi SFS-EN ISO 4063 määrittelee kaaritapitushitsauksen kuuluvan luokkaan ”Muut hitsausprosessit”. Kitkatapitushitsaus kuuluu luokkaan ”Puristushitsaus”. Standardi määrittelee seuraavat prosessinimet ja numerotunnukset (SFS-EN ISO 4063. 2011. s.15–17):

- nro 78: Kaaritapitushitsaus
- nro 783: Kaaritapitushitsaus nostosytytyksellä käyttäen keraamista rengasta tai suojakaasua
- nro 784: Lyhytjaksokaaritapitushitsaus nostosytytyksellä
- nro 785: Kaaritapitushitsaus kondensaattoripurkausmenetelmällä nostosytytyksellä
- nro 786: Kaaritapitushitsaus kondensaattoripurkausmenetelmällä karkisytytyksellä
- nro 787: Kaaritapitushitsaus sulavalla renkaalla
  
- nro 42: Kitkahitsaus
- nro 423: Kitkatapitushitsaus

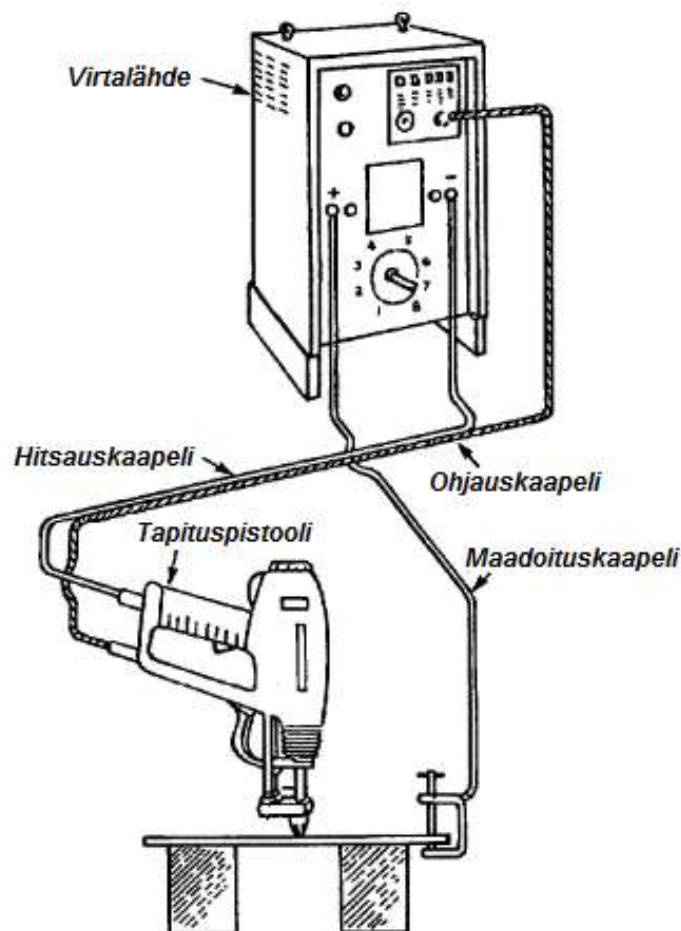
Kaaritapitushitsausta käsittelevä standardi SFS-EN ISO 14555 ei tunne prosessia 787 ”Kaaritapitushitsaus sulavalla renkaalla”. Ilmeisesti kyseessä on vanha menetelmä, jota ei enää nykyään käytetä. Se on tunnettu aikaisemmin Philips-menetelmänä (Blom 1975 s. 90). Tässä työssä ei käsitellä kyseistä menetelmää.

Kaaritapitushitsauksessa eli tapitushitsauksessa valokaari sytytetään hitsattavan tapin kärjen ja työkappaleen välille. Valokaari palaa tapin ja työkappaleen välillä 0,5...3000 ms ajan, jolloin molemmat osat sulavat ja hitsautuvat yhteen. Tapitushitsaus voidaan jaotella sytytystavan perusteella tapitushitsaukseen nostosytytyksellä ja tapitushitsaukseen karkisytytyksellä. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 58)

Hitsattavan työkappaleen pinnan tulee olla puhdas ja puhtauden merkitys korostuu kun hitsausajat ovat alle 50 ms pituisia. Työkappaleen pinta tulee puhdistaa maalista, ruosteesta, rasvasta ja muista epäpuhtauksista. Hitsaaminen ei vaadi lisäainetta, vaan

hitsisula muodostuu sulavasta tapista ja työkappaleesta, joista tappimateriaalia sulaa yleensä enemmän. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 64)

Kaaritapitushitsauksen etuina voidaan pitää nopeutta, hitsien laadukkuutta ja hitsauksen yksinkertaista suoritustapaa. Kaaritapitushitsauksessa työkappaleen koolla ja muodolla ei ole väliä. Hitsattavan tapin muodolla ei periaatteessa ole merkitystä, mutta rajoittava tekijä on, että tappi tulee voida kiinnittää hitsauspistooliin. Hitsauslaitteisto on sangen yksinkertainen ja käytettävissä myös asennusolosuhteissa. Kaaritapitushitsauslaitteisto on esitetty kuvassa 1. (Metals handbook 1983, s. 729)

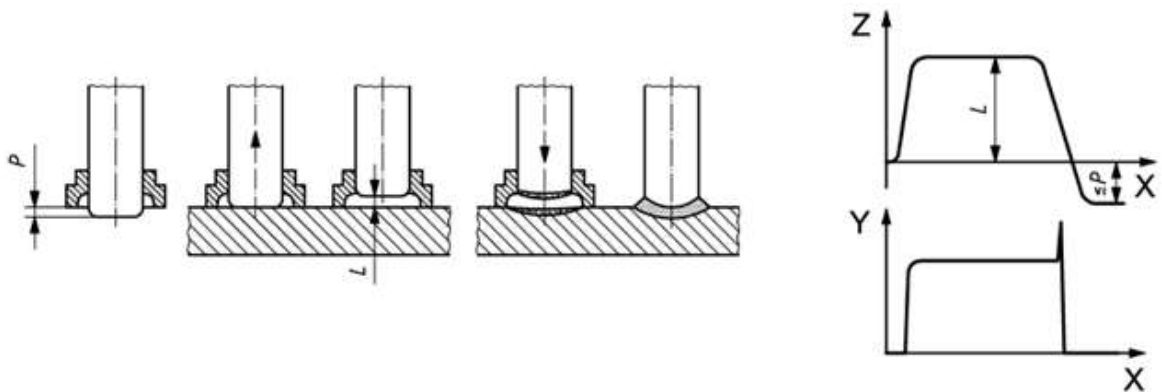


**Kuva 1.** Kaaritapitushitsauslaitteisto (Masubuchi 1977). (Kuvaa muokattu)

Hitsausvirtalähteitä on useita erityyppisiä. Prosesseissa 785 ja 786 käytetään aina kondensaattoripurkausvirtalähdettä. Prosesseissa 783 ja 784 on mahdollista käyttää tasasuuntaajaa tai muuttajaa virtalähteenä. (Blom 1975, s. 85)

## 2.1 Kaaritapitushitsaus nostosytytyksellä

Tapitushitsaus nostosytytyksellä (kuva 2) voidaan toteuttaa hitsauspistoolin tai hitsauspään avulla joko mekaanisesti tai automaattisesti. Hitsattavaan tappiin asetetaan keraaminen rengas ja tappi työnnetään tapinpitimeen. Tämän jälkeen tappi painetaan vasten työkappaletta. Hitsautapahtuman alussa tappi nostetaan irti työkappaleen pinnasta, jolloin valokaari syttyy tapin ja työkappaleen välille. Kun asetettu hitsausaika on kulunut loppuun, tappia painetaan työkappaletta vasten noin 100 N voimalla ja virtalähde kytkeytyy samanaikaisesti pois päältä, jolloin tappi hitsautuu kiinni työkappaleeseen. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 58) Nostosytytyksellä tapahtuva tapitushitsaus voidaan jaotella edelleen kolmeen eri menetelmään; tapitushitsaukseen käyttäen keraamista rengasta tai suojakaasua, lyhytjaksokaaritapitukseen ja tapitushitsaukseen kondensaattoripurkausmenetelmällä.



**Kuva 2.** Periaatekuva tapitushitsauksesta nostosytytyksellä sekä kuvaajat tapin liikkeestä ja hitsausvirran suuruudesta ajan funktiona (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 58). (kuva muokattu 26.2.2012)

kuvaajissa

$X$  = hitsausaika

$Y$  = hitsausvirta

$Z$  = tapin liikesuunta

### 2.1.1 Tapitushitsaus käyttäen keraamista rengasta tai suojakaasua

Tämä on yleisin tapitushitsauksen prosessisovellus. Hitsisulaa suojataan keraamisella renkaalla, suojakaasulla tai molemmilla. Erikoistapauksissa hitsaaminen on mahdollista myös kokonaan ilman hitsisulan suojausta. Prosessi soveltuu halkaisijaltaan 3...25 mm paksujen tappien hitsaamiseen. Hitsausaika on 100...3000 ms ja hitsausvirta 300...3000 A. Keraamista rengasta käytettäessä työkappaleen paksuuden on oltava vähintään  $0,25 \cdot d$ , mutta kuitenkin yli 1 mm. Mikäli käytetään suojakaasua, on työkappaleen paksuuden oltava vähintään  $0,125 \cdot d$ , mutta kuitenkin yli 1 mm. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 60)

Keraamisella renkaalla on useita tehtäviä hitsausprosessissa. Renkas muodostaa metallihöyryn täyttämän kammion hitsisulan ympärille ja siten suojaa hitsisulaa oksidoitumiselta sekä vähentää hitsiin jäävien huokosten määrää. Lisäksi renkas keskittää ja vakauttaa valokaaren tapin ja työkappaleen välille eli vähentää kaaripuhallusta. Renkas myös tukee hitsisulaa ja muotoilee jähmettyvän sulan kaulukseksi tapin juuren ympärille. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 62)

Suojakaasun tehtävä on syrjäyttää valokaarta ympäröivä ilma ja siten vähentää hitsin huokoisuutta. Teräksiä hitsattaessa suojakaasuna käytetään argonin ja hiilidioksidin seosta. Suojakaasua vaikuttaa hitsin tunkeumaan ja muotoon. Mikäli hitsin kaulus halutaan juohevaksi ja valokaari kohdistettua tarkasti tapin ja työkappaleen väliin, on syytä käyttää suojakaasun lisäksi myös keraamista rengasta. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 62)

### 2.1.2 Lyhytjaksokaaritapitushitsaus nostosytytyksellä

Tällä prosessilla hitsattaessa lämmöntuonti on pieni, joten sulamisvyöhyke on kapea. Suurin käytetty hitsausvirta on 1800 A, jolla voidaan hitsata enintään 12 mm paksuja tappeja. Prosessilla on mahdollista hitsata myös ilman hitsisulan suojausta, jolloin käytetään halkaisijaltaan alle 9 mm tappeja. Hitsausaika on alle 100 ms. Työkappaleen vähimmäispaksuuden on oltava  $0,125 \cdot d$ , mutta vähintään 0,6 mm. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 60)

### 2.1.3 Tapitushitsaus kondensaattoripurkausmenetelmällä ja nostosytytyksellä

Tällä prosessilla saavutetaan lyhyt, alle 10 ms pituinen hitsausaika. Prosessissa käytetään kondensaattoripurkausvirtalähdettä, jonka huippuvirta voi olla 4000 A. Tavallisesti



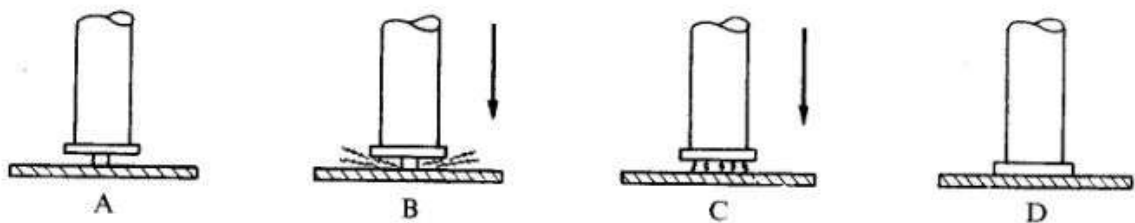
hitsisulaa ei suojata mitenkään. Hitsattavien tappien halkaisijat ovat 3...10 mm ja perusaineen vähimmäispaksuuden on oltava  $0,1 \cdot d$ , mutta vähintään 0,5 mm. Hitsaaminen ilman sulan suojausta on mahdollista, koska hitsausaika on lyhyt ja hitsattavan tapin halkaisija pieni. Hitsin oksidoituminen, huokoisuus ja kauluksen epämääräinen muoto ovat rajoittavia tekijöitä ilman suojausta tapahtuvalle hitsaukselle. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 60–62)

## 2.2 Kaaritapitushitsaus kärkisytytyksellä

Kärkisytytys voidaan tehdä joko kontaktilla tai ilmapälillä. Nostosytytyksessä ja kärkisytytyksessä käytettävä hitsaustappi on erilainen. Nostosytytyksessä käytettävän tapin pää on tasainen, kun taas kärkisytytyksessä käytettävässä tapissa on pieni nystyrä eli sytytyskärki, joka auttaa valokaaren syttymisessä. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 63)

### 2.2.1 Kärkisytytys kontaktilla

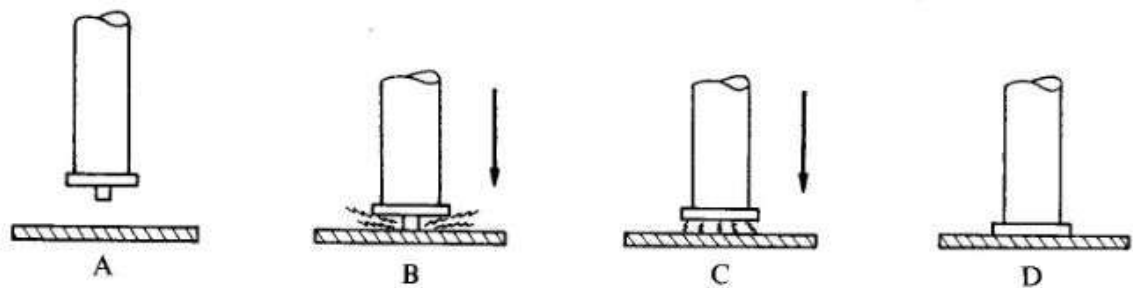
Hitsattava tappi asetetaan tapinpitimeen ja sytytyskärki painetaan työkappaletta vasten. Kun hitsauspistoolin liipaisinta painetaan, vapautuu kondensaattoriin varattu energia nopeasti jolloin sytytyskärki höyrystyy ja sytyttää valokaaren. Pistoolissa oleva jousi painaa tappia työkappaletta vasten jolloin tappi hitsautuu kiinni työkappaleeseen. Hitsaustapahtuman päävaiheet on esitetty kuvassa 3. Hitsausaika on 1...3 ms ja hitsausvirta noin 5000 A. Menetelmä soveltuu halkaisijaltaan 0,8...10 mm oleville tapeille ja tyyppillisesti sitä käytetään seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen hitsaukseen. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 62)



**Kuva 3.** Päävaiheet kaaritapitushitsauksesta, jossa käytetään sytytystapana kärkisytytystä kontaktilla (Blom 1975, s. 96).

### 2.2.2 Kärkisytytys ilmavälillä

Kärkisytytys ilmavälillä on hyvin samankaltainen kuin kärkisytytys kontaktilla, lukuun ottamatta hitsaustapahtuman alkua. Sytytyskärkeä ei paineta työkappaletta vasten vaan sitä pidetään hieman irti työkappaleen pinnasta. Kun kondensaattoriin varastoitu energia puretaan, pistoolin jousi painaa tappia kohti työkappaletta ja hitsausprosessi etenee tästä samoin kuin hitsattaessa kontaktilla. Hitsausvirta on noin 10000 A ja hitsausaika 0,5...2 ms. Menetelmää käytetään tavallisesti alumiinin ja messingin hitsaukseen. Kärkisytytys ilmavälillä on esitetty kuvassa 4. (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 62–64)



**Kuva 4.** Päävaiheet kaaritapitushitsauksesta, jossa sytytystapana käytetään kärkisytytystä ilmavälillä (Blom 1975, s. 96).

### 2.3 Kitkahitsaus

Kitkahitsauksessa tarvittava hitsausenergia saadaan liike-energiasta, joka muutetaan kitkan avulla lämpöenergiaksi hitsattavien kappaleiden välillä. Hitsattavia kappaleita puristetaan yhteen ja liikutetaan toisiinsa nähden. Liike on yleensä pyörivää, mutta se voi olla myös lineaarista tai orbitaaliliikettä. Liike-energia muuttuu lämmöksi joka kuumentaa liitospinnat tahdasmaiseen tilaan. Kun liike pysäytetään nopeasti ja puristusta jatketaan edelleen, hitsautuvat kappaleet kiinni toisiinsa. (Metals handbook, 1983, s. 719; SFS-EN ISO 15620. 2000. s. 7)

Kitkahitsaus ei vaadi lisäainetta eikä suojakaasua. Lämmöntuonti on pieni, joten muodonmuutokset ovat vähäisiä. Hitsin laatu ja liitoksen ominaisuudet ovat hyvät. Kitkahitsaus soveltuu hyvin eripariliitosten hitsaamiseen. (Esab, kitkahitsaus)

### 2.3.1 Kitkatapitushitsaus

Kitkatapitushitsauksessa hitsattavaa tappia pyöritetään ja puristetaan samanaikaisesti työkappaletta vasten kuvan 5 mukaisesti. Jähmetyttyään hitsi on kuvan 6 kaltainen. Kitkatapitushitsaus onnistuu myös ruosteen, maalin tai muun pinnoitteen lävitse. Hitsattava tappi poistaa pyöriessään epäpuhtaudet työkappaleen pinnalta, joten niillä ei ole vaikutusta hitsauksen lopputulokseen. Vähäisen lämmöntuontinsa ansiosta kitkatapitushitsaus on turvallinen hitsausmenetelmä, jota voidaan käyttää myös helposti syttyviä tai räjähtäviä aineita sisältävien säiliöiden ja putkien hitsaamiseen. (IEV Group)



**Kuva 5.** Kitkatapitushitsauksessa kuumeneva hitsaustappi (IEV Group)



**Kuva 6.** Valmis hitsi (What Is Friction Stud Welding)

Kitkatapitushitsauksessa käytettävä laitteisto on siirrettävissä ja siten soveltuu käytettäväksi esimerkiksi offshore-olosuhteissa. Tappia pyöritetään joko paineilma- tai hydraulikäyttöisellä hitsauspäällä, joka on kiinnitetty clampiin eli kiinnittimeen (kuva 7). Kiinnittimen tarkoitus on antaa tukeva kiinnitys alusta hitsauspäälle, jotta hitsauksen aikana saadaan riittävän suuri paine hitsattavan tapin ja työkappaleen välille. (Blakemore 1999)



**Kuva 7.** Hitsauspää ja vakuumikiinnitteinen hitsauspään kiinnitin eli clamp (Infrastructure Services - Friction Stud Welding).

Kiinnittimiä on saatavissa kolmella eri toimintaperiaatteella; mekaanisesti ja sähkömagneettisesti kiinnittyviä sekä tyhjiökiinnitteisiä. Lisäksi on olemassa näiden yhdistelmiä eli hybridejä. Mekaanisia kiinnittimiä käytetään usein silloin, kun tappeja hitsataan kiinni putkiin tai palkkeihin. Mekaaniset kiinnittimet voivat olla joko käsin kiinnitettäviä, hydraulisesti kiinnittyviä tai automaattisia ja etäohjattuja. Sähkömagneettisesti tarttuvaa kiinnitintä voidaan käyttää vain silloin, kun työkappale on ferromagneettinen. Sähkömagneettinen kiinnitin muodostuu sektoreista, jotka voivat liikkua toisiinsa nähden. Tällä tavalla kiinnitin voi tarttua myös kaarevaan tai epätasaiseen pintaan. Tyhjiökiinnitin tarttuu työkappaleeseen alipaineen avulla. Työkappaleen materiaalilla ja mahdollisella pintakäsittelyllä ei ole merkitystä, toisin kuin sähkömagneettikiinnittimen kohdalla. Tyhjiökiinnitin tarttuu myös kaareville pinnoille. Hybridikiinnittimellä saadaan yhdistettyä em. kiinnittimien parhaat puolet. Magneetti-tyhjiö-hybridikiinnitin on tyhjiökiinnitintä pienempi ja sähkömagneettikiinnitintä kevyempi. Silti se tarttuu työkappaleen pintaan suuremmalla voimalla kuin kumpikaan kiinnitin yksinään. (Blakemore 1999)

### 3 VEDENALAINEN HITSAUS

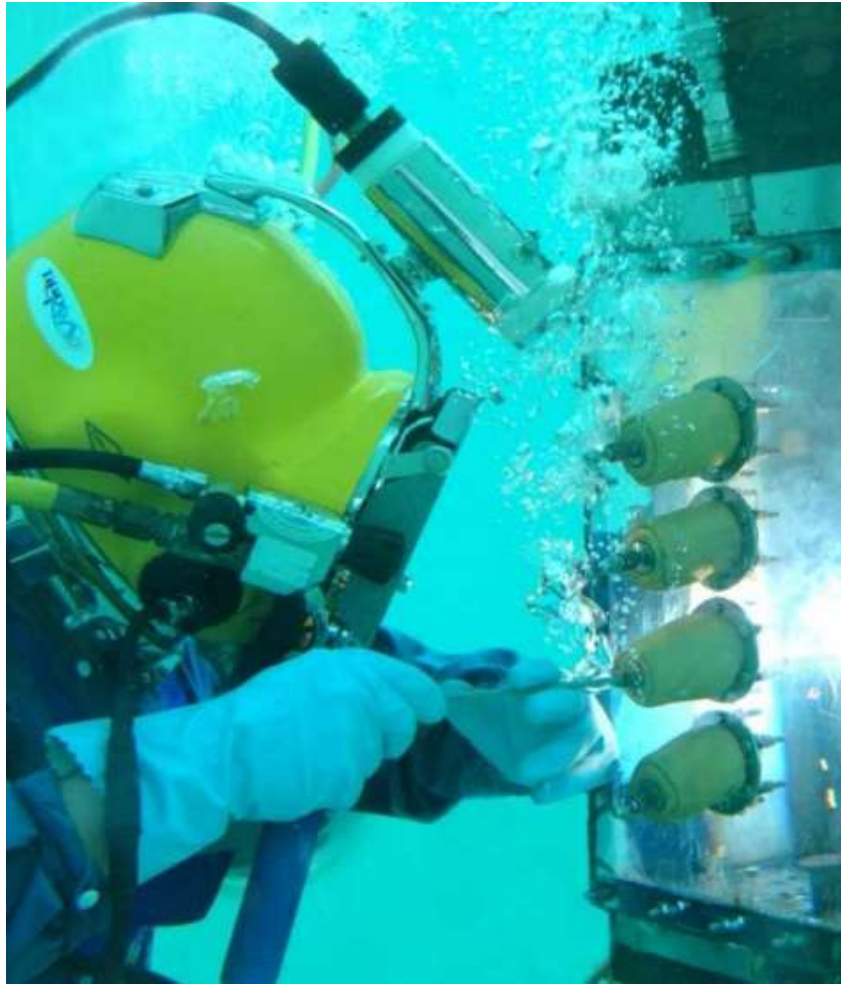
Vedenalaista hitsausta käytetään usein korjaushitsauksessa kun hitsattavaa kappaletta ei ole mahdollista siirtää pois vedestä. Vedenalaista hitsausta voidaan käyttää myös maakaasuputkilinjojen rakennusvaiheessa, kun putkia liitetään kiinni toisiinsa. Vedenalainen hitsaus voidaan jaotella märkä- ja kuivahitsaukseen riippuen siitä, pääseekö vesi hitsauksen aikana kosketuksiin hitsattavan kohdan kanssa. Märkähitsauksessa vesi pääsee välittömästi kosketuksiin hitsisulan kanssa, joten se jäädyttää sulan nopeasti ja aiheuttaa siten ongelmia verrattuna kuivahitsaukseen. Kuivahitsauksessa vesi pääsee hitsausliitoksen kanssa tekemisiin vasta hitsin jähmettymisen jälkeen, mikäli hitsattavaa aluetta suojaavaa kammioita pidetään riittävän kauan paikoillaan hitsauksen jälkeen.

#### 3.1 Märkähitsaus

Märkähitsauksessa ollaan suorassa kosketuksessa veteen eli hitsaaja, hitsattava kappale ja ainakin osa hitsauslaitteistoa on vedessä. Märkähitsauksessa käytettävien hitsauslaitteiden täytyy olla vedenkestäviä. Ne voivat olla joko alun perin suunniteltuja vedenalaiseen työskentelyyn tai jälkikäteen muutettu ja eristetty vedenalaiseen työskentelyyn sopiviksi. Märkähitsauksessa tyypillisesti käytettyjä hitsausprosesseja ovat puikkohitsaus, MAG-hitsaus ja MAG-hitsaus täytelangalla. (Metals handbook 1983, s. 921; Labanowski 2011)

#### 3.2 Kuivahitsaus

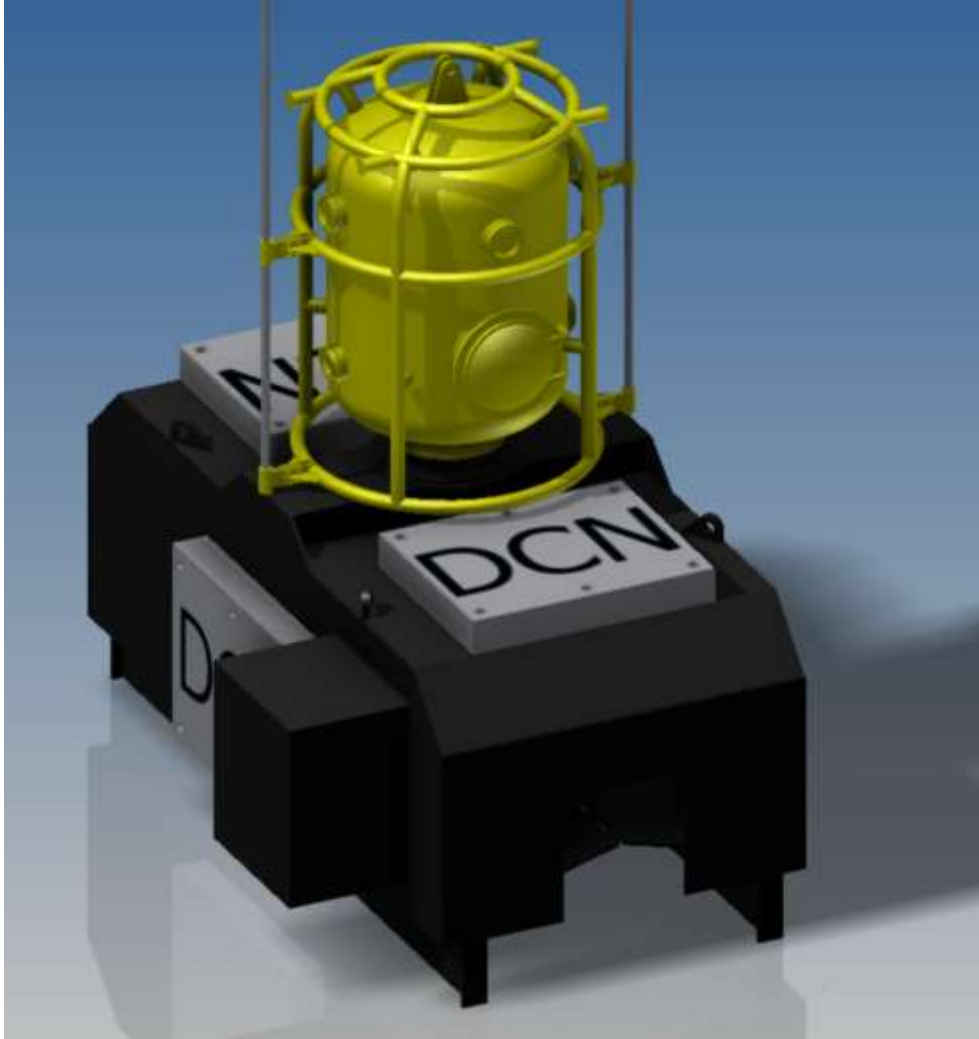
Kuivahitsauksessa yleisesti käytettyjä hitsausprosesseja ovat TIG-hitsaus, MIG/MAG-hitsaus sekä MAG-täytelankahitsaus (Labanowski 2011). Kuivahitsauksessa työskennellään myös veden alla, mutta vähintään hitsattava alue on eristetty vedestä vesitiiviillä kammioilla. Vedeltä eristetyn kohteen laajuus vaihtelee riippuen käytetystä menetelmästä. Dry-spot menetelmässä hitsattavan kohteen päälle kiinnitetään imukupeilla tai magneeteilla kammio, joka täytetään suojakaasulla. Kaasun paine tyhjentää kammion vedestä. Kaasu vaihtuu kammiossa hitsauksen ajan ja kuljettaa hitsaushuurut ja – savut pois kammioista sekä estää veden pääsyn kammioon. Dry-spot menetelmässä käytettävä kammio on esitetty kuvassa 8. (Schwan 2011)



**Kuva 8.** Vedenalaista puikkohitsausta dry-spot-kammiota apuna käyttäen (Schwan 2011).

Dry-box menetelmä on samankaltainen kuin dry-spot, mutta hitsattavaa kohtaa suojaava kammio on suurempi. Dry-box menetelmässä käytettävään kammioon mahtuu hitsauslaitteiston lisäksi myös sukelluspuvussa olevan hitsarin pää ja olkapäät jolloin työskenteleminen on helpompaa kuin dry-spot kammiossa. (Metals handbook 1983, s. 921; Labanowski 2011)

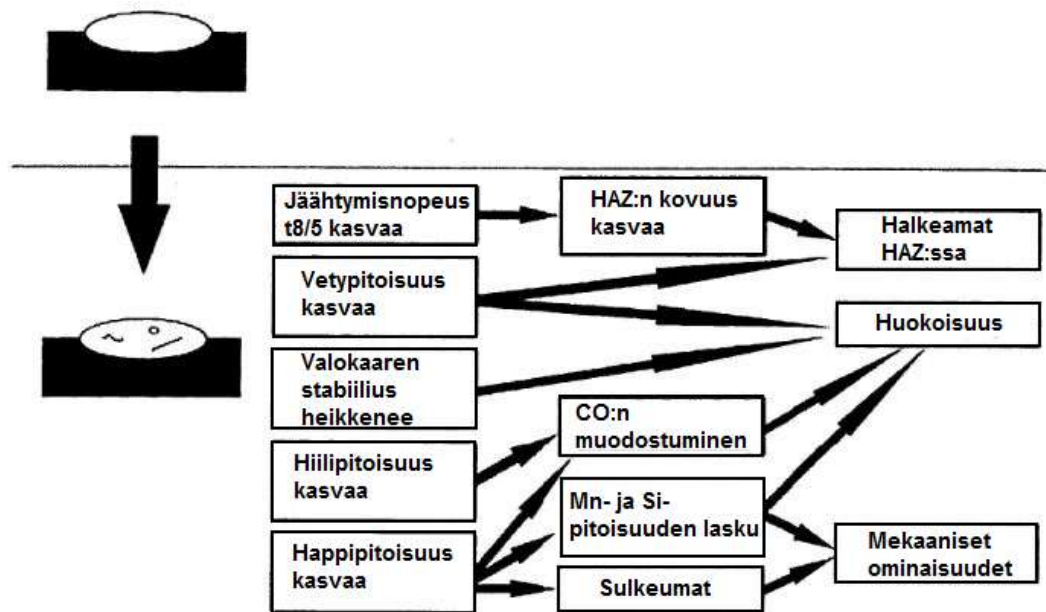
Hitsattava alue on mahdollista eristää vedestä myös kuvan 9 kaltaisella hitsausmoduulilla, jonka sisällä sukeltajat voi työskennellä ilman sukellusvarusteita. Moduulin sisälle asennetaan täysautomaattinen hitsauslaite, jota operoidaan pinnalta sukellustukialukselta. Moduulissa hitsatut hitsit ovat laadukkaita ja niille voidaan tehdä NDT tarkastuksia. Menetelmää käytetään paljon putkilinjojen vedenalaisessa hitsauksessa. (DCN Diving; Nord Stream)



**Kuva 9.** DCN Diving Groupin Hyperbaric-hitsauskammio putkien hitsaamiseen (DCN Diving)

### 3.3 Veden ja paineen vaikutus hitsausliitoksen ominaisuuksiin

Märkähitsauksessa vesi vaikuttaa jähmettyvän hitsausliitoksen fysikaalisiin ja metallurgisiin ominaisuuksiin useilla eri tavoilla. Usein esiintyviä ongelmia ovat halkeamat muutosvyöhykkeessä, vety- ja jähmettymishalkeamat hitsiaineessa sekä hitsiaineen huokoisuus. (Liu et. al. 1994) Veden vaikutukset hitsausliitoksen ominaisuuksiin ja vaikutusten riippuvuus toisistaan on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Veden vaikutus hitsausliitoksen ominaisuuksiin sekä vaikutusten riippuvuus toisistaan (Labanowski 2011). (Tekstit suomennettu)

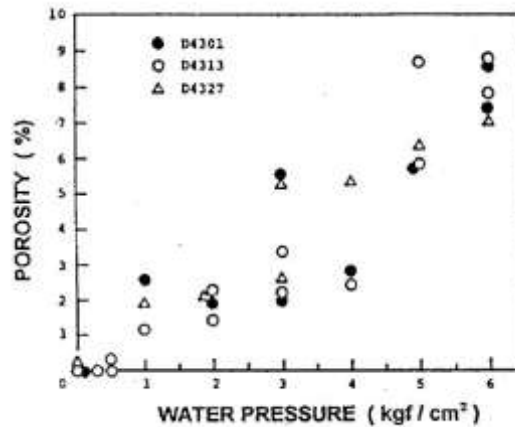
Vety- eli kylmähalkeamat ovat hitsiaineeseen liunneen vedyn ja rakenteen jännitysten aiheuttamia halkeamia, jotka syntyvät hitsausliitoksen alueelle. Halkeama voi syntyä hitsiaineeseen, muutosvyöhykkeeseen tai sularajalle. Märkähitsauksessa vesi jähdyttää hitsin ja ympäröivän perusaineen paljon nopeammin kuin ilma. Nopean jähmettymisen seurauksena teräs karkenee voimakkaasti, eli HAZ:iin muodostuu paljon martensiittia ja bainiittia jotka ovat molemmat lujia mutta hauraita mikrorakenteita sekä alttiita vetyhalkeamille. Märkähitsauksessa vesi on suorassa kosketuksessa hitsattaviin pintoihin, mistä johtuen vetyä muodostuu hitsauksen aikana runsaasti ja sitä pääsee liukenemaan hitsiin kuivahitsausta enemmän. (Liu et. al. 1994; Lukkari 2000–2001 s. 8-9)

Märkähitsauksessa hitsiaineeseen muodostuu kaasuonteloita eli huokosia enemmän kuin kuivahitsauksessa. Huokokset voivat esiintyä yksittäisinä, jonomaisina muodostelmina tai huokosryhminä. Seostamattomien ja niukkaseosteiden terästen hitsauksessa huokosia aiheuttavat vety, happi ja typpi. Ne voivat olla peräisin perus- tai lisäaineen epäpuhtauksista kuten ruosteesta tai rasvasta, mutta vedenalaisessa hitsauksessa suurin huokosten aiheuttaja on vedestä liunnut vety. (Lukkari 2000–2001 s. 10)

Veden hydrostaattinen paine vaikuttaa hitsin iskutkeyteen ja huokoisuuteen. Mitä kovempi paine on, sitä enemmän hitsiin jää huokosia ja hitsin iskutkeyden heikkenee.



Esimerkkitapaus paineen vaikutuksesta hitsiin jäävien huokosten määrään on esitetty kuvassa 11. Kuvaajassa olevat D4301, D4313 ja D4327 ovat JIS-standardin mukaan luokiteltuja hitsauspuikkoja (Nihonweld).

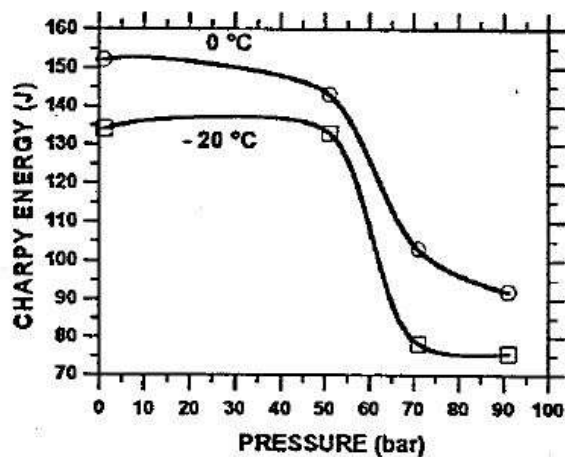


**Kuva 11.** Paineen ja huokoisuuden välinen riippuvuus (Suga & Hasui 1986).

(1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0,98 bar)

Kuvaajasta nähdään, että huokoisuus hitsissä lisääntyy paineen kasvaessa. Kuvaajasta ei ilmene, jatkuuko huokoisuuden lisääntyminen paineen edelleen kasvaessa vai vakiintuuko se johonkin tiettyyn arvoon.

Paine vaikuttaa myös hitsausliitoksen iskusitkeyteen. Iskusitkeyden ja paineen välistä riippuvuutta on havainnollistettu kuvassa 12.



**Kuva 12.** Paineen vaikutus iskusitkeyteen Charpy-V-kokeella mitattuna (Camerini & Dos Santos 1994).

Kuvaajasta nähdään, että iskutila alkaa heiketä oleellisesti vasta 50 barin kohdalla. Vedessä 50 barin paine on noin 500 metrin syvyydessä.

### 3.4 Valmiit laitteistot vedenalaiseen hitsaukseen

Vedenalaiseen hitsaukseen on kehitetty valmiita hitsauslaitteistoja. Tässä työssä käsitellään ainoastaan vedenalaiseen kaari- ja kitkatapitushitsaukseen soveltuvia laitteistoja. Periaatteessa mikä tahansa hitsauslaitteisto soveltuu vedenalaiseen työskentelyyn jos hitsaus on mahdollista suorittaa vesitiiviissä kammiossa. Tilanne kuitenkin muuttuu, jos hitsaus täytyy suorittaa märkähitsauksena tai pienessä kammiossa, johon laitteisto joudutaan siirtämään veden kautta. Märkähitsauksessa laitteiston tulee kestää vettä ja lisäksi hitsausprosessin on oltava sellainen, että märkähitsaus on ylipäättään mahdollista.

#### 3.4.1 Vedenalaiseen kaaritapitushitsaukseen soveltuvat laitteistot

Vedenalaiseen kaaritapitushitsaukseen kehitettyjä valmiita laitteistoja ei muutaman tunnin Internet-hakujen ja kirjallisuuskatsauksen perusteella löytynyt. Asiaa on kuitenkin tutkittu ja aiheesta on jätetty kaksi patenttihakemusta, ensimmäinen vuonna 1975 ja jälkimmäinen vuonna 2009.

Vuonna 1975 laaditun patenttihakemuksen on jättänyt Massachusetts Institute of Technology. Hakemuksen nimi on ”Underwater stud welding gun” eli vedenalainen tapitushitsauspistooli. Keksijät ovat Koichi Masubuchi ja Muneharu Kutsuna. Patenttihakemus on saatavissa pdf-muodossa osoitteesta: <http://www.freepatentsonline.com/4475026.pdf>

Vuoden 2009 hakemuksen on jättänyt Nelson Stud Welding ja keksijä on Clark Champney. Patenttihakemuksen nimi on ”Sealed and pressurized gun for underwater welding” eli tiivistetty ja paineistettu pistooli vedenalaiseen hitsaukseen. Patenttihakemus on saatavissa pdf-muodossa osoitteesta: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Sealed-pressurized-gun-underwater-welding/WO2010017446A2.pdf>.

### 3.4.2 Vedenalaiseseen kitkatapitushitsaukseen soveltuvat laitteistot

Vedenalaiseseen kitkatapitushitsaukseen soveltuvia kaupallisia laitteistoja on olemassa. Eräs laitevalmistaja on Proserv Offshore (<http://www.proserv.com>) jonka valikoimiin kuuluu sekä hydraulisella että pneumaattisella voimansiirrolla toimivia laitteistoja. (Proserv Offshore)

Laitteistosta riippuen niitä voi käyttää sukeltaja (kuva 13) tai vaihtoehtoisesti niitä voidaan operoida ROV:lla pinnalta käsin. Suurimmilla laitteilla on mahdollista hitsata 1000 metrin syvyydessä ja niitä voidaan operoida pinnalta neljän kilometrin etäisyydeltä. (Proserv Offshore; Howes 2009)

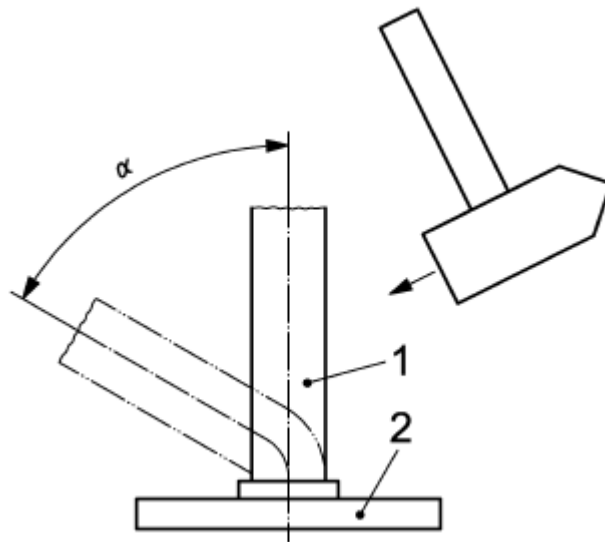


**Kuva 13.** Sukeltajien käyttämä kitkatapitushitsauslaitteisto (Young 2007, s. 3)

## 4 HITSAUSKOKEET

Hitsauskokeet suoritettiin LUT Metallin hitsaustekniikan laboratoriossa. Kokeissa hitsattiin M3, M6 ja M8x30 tappeja kiinni rakenneteräslevyyn. Jokaista tappikokoa hitsattiin sekä kuivana että vedessä.

Hitsauksen jälkeen liitoksen lujuus testattiin suorittamalla taivutuskoe standardin SFS-EN ISO 14555:n mukaan. Taivutuskokeessa hitsattu tappi lyödään vähintään 60°:een kulmaan kuvan 14 mukaisesti.



**Kuva 14.** Periaatekuva taivutuskokeesta (SFS-EN ISO 14555. 2007. s. 38)

### 4.1 Koejärjestely

Käytetty hitsausmenetelmä oli kaaritapitushitsaus nostosytytyksellä käyttäen keraamista rengasta. Kokeessa käytetyt tapit olivat tarkoitettu kaaritapitushitsaukseen kondensaattoripurkausmenetelmällä, eli niiden päässä oli pieni alumiininasta. Näitä tappeja käytettiin siksi, että näin saatiin hitsaus onnistumaan paremmin verrattuna nastattomiin tappeihin. Tapitushitsauslaitteisto oli merkiltään CromptArc M16 ja hitsausvirtalähteenä käytettiin jauhekaaritapitushitsaukseen tarkoitettua ESAB LAD1000-virtalähdettä.

Hitsaukset suoritettiin märkähitsauksena veden syvyyden ollessa noin 50 mm. Altaan pohjalle asetettiin 6 mm paksu rakenneteräslevy, johon tapit hitsattiin ja johon

maadoituskenkä kiinnitettiin. Levy oli veden alla koko hitsaustapahtuman ajan. Hitsaustapahtuma on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15.** Kaaritapitushitsausta koealtaassa.

Hitsauksen jälkeen tapeille suoritettiin taivutuskoe. Onnistunut hitsi kesti kyseisen testin murtumatta. Kuvassa 16 on esitetty kuivassa hitsattu tappi, jolle taivutuskoe on suoritettu.



**Kuva 16.** Kuivassa hitsattu taivutuskokeen kestänyt tappi

#### 4.2 Koetulokset

M3 tappien hitsaus onnistui sekä kuivana, että veden alla. M6 tappien hitsaus onnistui aluksi vain kuivana, mutta virran noston jälkeen hitsaukset onnistuivat myös veden alla.

M8x30 tappien hitsaus onnistui aluksi vain kuivana. Hitsausvirtaa vaihdeltiin välillä 1000...2000 A. Hitsausaika pidettiin koko ajan vakiona, eli 0,1 sekunnissa. Virran ja jännitteen noston jälkeen hitsaukset saatiin onnistumaan myös veden alla. Liitteessä 1 on kuvaaja onnistuneen vedenalaisen hitsauksen hitsausvirrasta ajan suhteen.

Yhdestä veden alla hitsatusta, taivutuskokeen hyväksytysti läpäisseestä tapista tehtiin hie ja siitä otettiin makrokuva joka on esitetty kuvassa 17.



**Kuva 17.** Makrokuva taivutuskokeen läpäisseestä hitsausliitoksesta.

Kuvasta nähdään, että hitsissä on useita liitosvirheitä sekä onteloita. Niistä ei kuitenkaan ole haittaa, koska taivutuskokeen kestänyt hitsausliitos on riittävän luja käytännön sovelluskohteeseen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työ osoittautui haastavaksi koska vedenalaista tapitus- ja kitkahitsausta käsittelevää tieteellistä lähdeaineistoa löytyi hyvin niukasti. Tapitushitsauksen kohdalla lähdeaineisto oli myös vanhaa. Patenttihakemusten perusteella voidaan päätellä, että aihetta on tutkittu jo 1970-luvulla, mutta jostain syystä tutkimukset eivät ole jatkuneet. Toinen patenttihakemus, vuodelta 2009, antaa viitteitä siitä, että asiaa on tutkittu myös viime vuosina, mutta mitään tutkimusraporttia tai valmista kaupallista sovellusta ei ainakaan tämän kandidaatintyön kirjoitushetkellä löytynyt. Kitkatapitushitsauksen kohdalla tilanne oli parempi ja valmiita kaupallisia laitteistojakin on olemassa, eli kyseinen menetelmä toimii myös vedessä.

Hitsauskokeiden perusteella voidaan sanoa, että tapitushitsaus on mahdollista märkähitsauksena ainakin matalissa syvyyksissä. Hydrostaattisen paineen vaikutusta hitsausliitoksen onnistumiseen ei ollut mahdollista kokeilla. Lopputulosta on vaikea arvioida, mutta todennäköisesti paine aiheuttaa lisähaasteita hitsausliitoksen onnistumiselle. Suurempi paine aiheuttaa hitsiin todennäköisesti pahempia huokosia ja liitosvirheitä, mutta ei välttämättä niin pahoja, että niistä olisi käytännön tilanteessa haittaa, mikäli liitos vain kestää taivutuskokeen.

Jatkoa ajatellen olisi hyvä päästä tekemään hitsauskokeita syvemmissä koealtaassa joka olisi mahdollista paineistaa. Kokeet edellyttäisivät vesitiivistä tapituspistoolia, mikäli hitsaukset halutaan suorittaa märkähitsauksena. Tässä vaiheessa kannattaisi ottaa yhteyttä Clark Champneyhin sekä Nelson Stud Welding:iin ja tiedustella, onko patenttihakemus johtanut kaupallisen laitteiston rakentamiseen tai olisiko heillä kiinnostusta yhteistyöhön sellaisen kehittämiseen.

## 6 YHTEENVETO

Vedenalaista kaari- ja kitkatapitushitsausta on mahdollista hyödyntää useissa sovelluskohteissa aina korjaushitsauksesta uusien putkilinjojen ja niiden varusteluosien hitsaamiseen. Kaaritapitushitsauksen osalta aihetta on tutkittu vähän, eikä siitä ole olemassa kaupallisia hitsauslaitteistoja. Kitkatapitushitsauksen kohdalla tilanne on parempi ja valmiita laitteistoja erityyppisiin sovelluskohteisiin on saatavissa.

Työn päätavoite oli selvittää, onko kaaritapitushitsaus mahdollista veden alla märkähitsauksena. Kirjallisuusselvitys ja koetulokset osoittavat, että hitsaaminen on mahdollista mutta sen hyödyntäminen käytännön tilanteissa vaatisi hitsauslaitteistolta vesitiiviyyttä ja monipuolisilla säädöillä varustetun hitsausvirtalähteen. Lisäksi asia vaatisi lisätutkimuksia joissa selvitettäisiin veden hydrostaattisen paineen vaikutuksia hitsaustapahtuman onnistumiseen ja hitsausliitoksen ominaisuuksiin.



## LÄHTEET

Blakemore, B. R., 1999, Underwater applications of state of the art portable friction stud welding equipment, Hydro Marine Systems.

Blom, S., 1975. Hitsaustekniikka 1, Hitsausmenetelmät. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiön laakapaino. 293 s.

Camerini, C. S., Dos Santos, V. R., 1994, Underwater welding at Petrobras.

DCN Diving Group, [www-sivu], [viitattu 9.3.2012]. Saatavissa: <<http://www.dcndiving.com/index.php/en/dcnoffshore/hyperbaric-welding>>

Hitsauspää ja clamp, [kuva], [viitattu 19.5.2012]. Saatavissa: <[http://www.proserv.com/modules/xnews/index.php?topic\\_id=53](http://www.proserv.com/modules/xnews/index.php?topic_id=53)>

Howes, J., 2009, Underwater welding, The Lost Arc. [viitattu 20.5.2012]. Saatavissa: <[http://www.ut-2.com/magazine\\_issues/2009\\_March.pdf](http://www.ut-2.com/magazine_issues/2009_March.pdf)>

IEV Group, Friction Stud Welding System. [www-sivu], [viitattu 27.2.2012]. Saatavissa: <<http://www.i-visionsb.com/iev/oilNgasDivision.htm>>

Labanowski, J., 2011, Development of under-water welding techniques, Welding International, Vol. 25, No. 12.

Liu, S., Pope, A., Daemen, R., 1994, Welding consumables and weldability, Center for Welding and Joining Research, Colorado.

Lukkari, J., Hitsien laatu ja hitsausvirheet, Hitsausuutisissa julkaistut artikkelit , osat 1-5, 2000-2001, [pdf-tiedosto], [viitattu 11.3.2012]. Saatavissa: <[http://www.esab.fi/fi/fi/support/upload/Hitsien\\_laatu\\_ja\\_hitsausvirheet.pdf](http://www.esab.fi/fi/fi/support/upload/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf)>

Masubuchi, K., 1977, Underwater stud welding, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge.

Metals handbook, Vol. 6, 1983, Welding, brazing and soldering, Metals Park, OH: American Society for Metals, 1152 s., ISBN: 0-87170-012-3.

MME Department of Metallurgical and Materials Engineering, IIT Madras, Friction Welding Machine [www-sivu], [viitattu 28.2.2012]. Saatavissa: <  
<http://www.mme.iitm.ac.in/activities/node/227>>

Nihonweld Industrial Welding Corporation. [www-sivu], [viitattu 27.8.2012]. Saatavissa: <  
[http://www.nihonweld.com/products.do?category\\_id=2083](http://www.nihonweld.com/products.do?category_id=2083) >

Nord Stream, [www-sivu], [viitattu 16.5.2012]. Saatavissa: <http://www.nord-stream.com/fi/tiedotus/tiedotteet/nord-stream-putkilinja-ottaa-jaelleen-askelen-laehemmaes-valmistumista-330/>

Oy Esab, Hitsaustietoa, Kitkahitsaus [www-sivu], [viitattu 27.2.2012]. Saatavissa: <  
<http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-fsw.cfm>>

Proserv, Subsea Friction Welding Of Anodes On An Offshore Drilling Rig. [viitattu 20.5.2012]. Saatavissa:  
<[http://www.proserv.com/uploads/Proserv\\_media/Case\\_Studies/Friction\\_Stud\\_Welding/Subsea\\_Friction\\_Welding.pdf](http://www.proserv.com/uploads/Proserv_media/Case_Studies/Friction_Stud_Welding/Subsea_Friction_Welding.pdf)>

Retco Oy, Kaaritapitushitsaus [www-sivu], [viitattu 22.2.2012]. Saatavissa:  
<<http://www.retco.fi/fi/tuotteet/kaaritapitushitsaus/kaaritapitushitsaus-yleista.html>>

Schwan, B., 2011, Schweißen im Meer [www-sivu], [viitattu 2.3.2012]. Saatavissa:  
<<http://www.heise.de/tr/artikel/Schweissen-im-Meer-1385861.html>>

Suga, Y., Hasui, A., 1986, On formation of porosity in underwater weld metal. IIW Doc.

Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2000. Standardi SFS-EN ISO 15620. Hitsaus. Metallisten materiaalien kitkahitsaus. 2. painos. 37 s.

Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2007. Standardi SFS-EN ISO 14555. Hitsaus. Metallisten materiaalien kaaritapitushitsaus. 2. painos. 122 s.

Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, 2011. Standardi SFS-EN ISO 4063: Hitsaus ja niiden lähiprosessit. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset. 2. painos. 26 s.

What Is Friction Stud Welding, [www-sivu], [viitattu 19.5.2012]. Saatavissa: <  
<http://www.squidoo.com/friction-stud-welding> >

Young, J., 2007. Underwater Friction Stud Welding System. One Step Closer to the Fleet. Faceplate. The Official Newsletter for the Divers and Salvors of the United States Navy. [www-sivu], [viitattu 27.5.2012]. Saatavissa:  
<[http://www.supsalv.org/pdf/FACEPLATE\\_APRIL%202007.pdf](http://www.supsalv.org/pdf/FACEPLATE_APRIL%202007.pdf)>

## LIITE 1

