

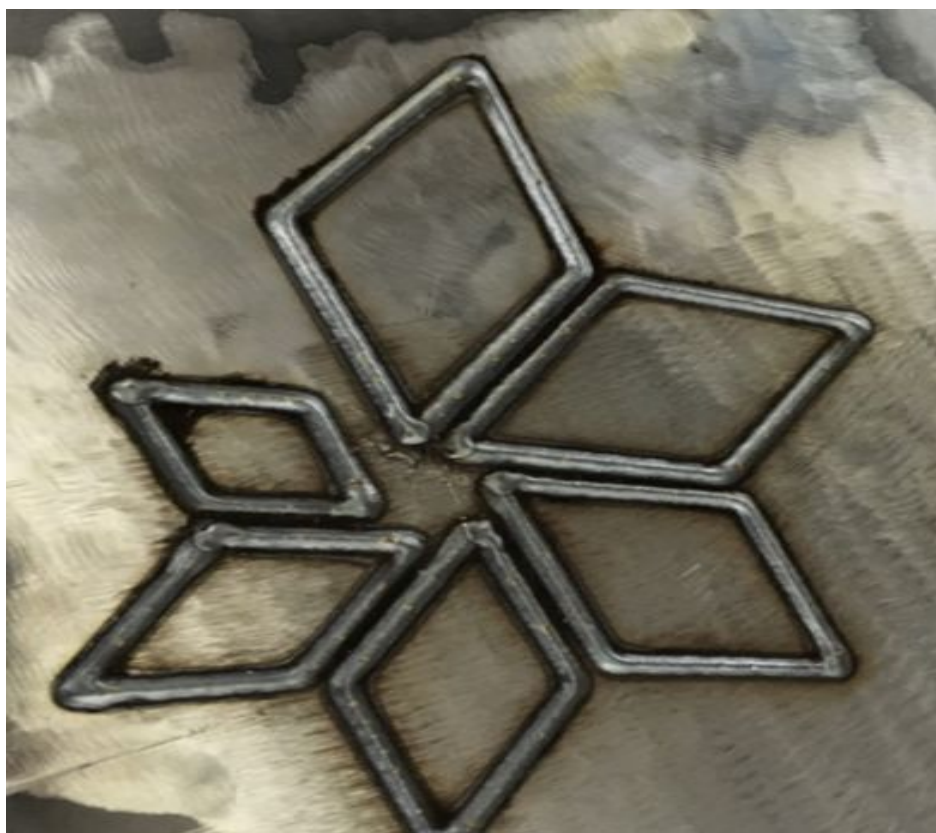
# Hardhetsreduksjon i varmepåvirket sone ved sveisereparasjon på utstyr i drift

Bacheloroppgave våren 2020

*Ståle Singstad Stegavik, Jørgen Kristensen og Thomas Stolpnes*

Prosjektnummer: IMA-B-23

Gradering: Åpen



Oppdragsgiver: Equinor Tjeldbergodden

Intern veileder: Sverre Gullikstad Johnsen (NTNU)

Eksterne veiledere: Geir Morten Vikan (Equinor)  
Gisle Rørvik (Equinor)



**NTNU**

Kunnskap for en bedre verden

# Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet ved NTNU, Institutt for materialteknologi. Hensikten med oppgaven var å bistå Equinor med litteratursøk og testing for å videreutvikle konseptet on-site repair. Prosjektet ble ledet av vår eksterne veileder Geir Morten Vikan. Vi vil takke for godt samarbeid og muligheten til å få tatt del i dette spennende prosjektet. Vi vil takke vår interne veileder Sverre Gullikstad Johnsen for god oppfølging og veiledning under utarbeidelsen av rapporten.

## **Vi vil også benytte anledningen til å takke:**

- Firmaet Migatronic for reparering av robot
- Eirik Belland og Helge Olav Strand fra Effe Induction for godt samarbeid og arbeid med induksjonsprosessen.
- Arild Alstad fra Equinor for ypperlig jobb som operatør av robot.
- Peder Solum Witsø fra Equinor for tilbakemeldinger på resultatdelen i rapporten.
- NTNU for bruk av laboratorium og utstyr
- Andrey Kosinskiy for veiledning på laboratorium.

## Sammendrag

Denne rapporten tar for seg identifisering og testing av en mulig metode å gjennomføre sveisereparasjoner av korrosjonsskader på utstyr i drift på olje- og gassanlegg. Eksempler på slikt utstyr er rør og tanker. Bakgrunnen for oppgaven er det store potensiale når det gjelder kostnadsbesparelser i olje- og gassindustrien. Sveisereparasjoner på utstyr gjennomføres ved planlagte nedstengninger under kontrollerte forhold for å unngå lekkasjer og unødvendig fare. De største tapene i denne industrien er produksjonstap, som øker med nedetiden. Produksjonstapene overskrider flere millioner kroner hver eneste dag ved driftsstans.

On-site repair er et konsept som utvikles av Equinor. I konseptet tar de i bruk sveising med robot, da det er mer stabilt og HMS-vennlig enn ved bruk av en dyktig sveiser. Det vil være mindre sjanser for skader på personell, ettersom roboten kan programmeres, overvåkes og styres på avstand. Robotsveising tilbyr generelt en mer stabil sveiseprosess og lengre perioder med sveising uten behov for pause. Det er mange fordeler med bruk av robot til sveising på utstyr i drift, men det er også noen utfordringer. Det kommer av at det på for eksempel rør og tanker er medium med kjøleeffekt på innsiden. Dette fører til rask nedkjøling i den varmepåvirkede sonen som oppstår under sveising. Konsekvensen av dette er en høy hardhet i materialet som kan føre til brudd forårsaket av sprøhet.

Som en mulig metode for å løse hardhetsproblemet er det sett på bruk av induksjon som etterbehandlingsmetode for å temperere den varmepåvirkede sonen etter sveising, og dermed oppnå en langsommere nedkjøling. Induksjon som etterbehandlingsmetode er testet på en sveis på en karbonstålplate med sirkulerende vann på baksiden. Metoden har vist seg å fungere, da det er observert en signifikant hardhetsreduksjon i prøvene. For øyeblikket ser man kun fordeler med denne metoden, men det kan fortsatt oppstå uforutsette utfordringer som må løses før metoden kan anvendes på utstyr i drift. For høy hardhet i materialet var tidligere et stort problem, men nå ser fremtiden for konseptet lysere ut. Equinor er nå et skritt nærmere å realisere visjonen om mindre nedetid og store kostnadsbesparelser på olje- og gassanlegg.

## Abstract

This report deals with the identification and testing of a possible method to carry out welding repairs of corrosion damage on equipment in operation at oil and gas plants. Examples of such equipment are pipes and tanks. The reason for this project is the great potential in terms of cost savings in the oil and gas industry. Welding repairs on equipment are carried out at scheduled shutdowns under controlled conditions to avoid leaks and unnecessary danger. The biggest losses in this industry are production losses, which increases with downtime. Production losses exceed several million NOK every single day during a shutdown.

On-site repair is a concept developed by Equinor. In the concept a robot is used for welding, as it is more stable and HSE-friendly than a skilled welder. There will be less chance of injury to personnel, since the robot can be programmed, monitored and controlled remotely. Welding with a robot generally offers a more stable welding process and longer periods of welding without the need for a break. There are many advantages to using a robot for welding equipment in operation, but there are also some challenges. This is because pipes and tanks have medium with a cooling effect on the inside. This leads to rapid cooling in the heat affected zone that occurs during welding. The consequence of this is a high hardness value in the heat affected zone which can lead to fractures caused by brittleness.

As a possible method to solve the hardness problem, the use of induction is considered as a post weld heat treatment to temper the heat affected zone after welding, and thus achieve a slower cooling. Induction as a post weld heat treatment has been tested on a weld on a carbon steel plate with circulating water on the backside. The method has proven to significantly reduce the hardness in the material, as shown in the samples. So far only benefits have been seen with this method, but unforeseen challenges may still be encountered before the method can be applied to equipment in operation. Excessive hardness in the material used to be a big problem, but now the future of the concept looks brighter. Equinor is now one step closer to realizing the vision of less downtime and large cost savings at oil and gas plants.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forkortelser</b> .....	<b>7</b>
<b>Innledning</b> .....	<b>8</b>
<b>Teori</b> .....	<b>10</b>
Material.....	10
<i>Materialegenskaper</i> .....	10
<i>Heat affected zone</i> .....	11
<i>Innbrenning</i> .....	12
<i>Nedkjølingstid</i> .....	13
Gas Metal Arc Welding.....	16
Temper bead.....	17
Sveiseparametre.....	19
<i>Varmetilførsel</i> .....	19
<i>Gassblanding</i> .....	20
Alternativ etterbehandling.....	23
<i>Post weld heat treatment</i> .....	23
<i>Induksjon</i> .....	23
<b>Materialer og metoder</b> .....	<b>26</b>
ASTM SA 516 Gruppe 70 stål.....	26
Testing.....	27
<i>Sveiseprosessen</i> .....	27
<i>Varmebehandling med induksjonsspole</i> .....	28
Klargjøring av prøver.....	30
Hardhetsmåling.....	31
Mikroskopi.....	31
<b>Resultater</b> .....	<b>32</b>
Hardhetsmålinger.....	32
Mikrostruktur.....	40
<b>Diskusjon</b> .....	<b>45</b>
Sveisemetode og sveiseparametre.....	45
Induksjon som etterbehandlingsmetode.....	46
HAZ og nedkjølingstid.....	47
Hardhetsreduksjon.....	48
Feilkilder og usikkerhet knyttet til målingene.....	49
Veien videre for on-site repair.....	51
<b>Konklusjon</b> .....	<b>53</b>

<b>Referanser</b> .....	<b>54</b>
<b>Vedlegg</b> .....	<b>60</b>

## Forkortelser

ASME	The American Society of Mechanical Engineers
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HAZ	Heat Affected Zone
HV	Hardness Vickers
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PWHT	Post Weld Heat Treatment

# 1. Innledning

Mennesker har i olje- og gassindustrien gjennomført store prosjekter med konstruksjoner av stål. Fordelene ved bruk av stål er mange, men det oppstår også utfordringer med bruk av disse materialene. I en årrekke har olje- og gassindustrien hatt store utfordringer med korrosjon. Korrosjon kan oppstå på ulike måter, men en tommelfingerregel er at korrosjon som regel oppstår i kontakt med vann. I olje- og gassindustrien er det et stort antall rør og tanker som lider av korrosjon. Korrodering av stålrør og ståltanker vil typisk føre til overflatesprekker. Dette kan i verste fall føre til at det oppstår brudd, noe som vil være katastrofalt både på landanlegg og plattformer. Det er derfor av stor interesse å gjennomføre vedlikehold for å unngå uønskede hendelser.

En løsning, når det har oppstått korrosjon, er sveisereparasjon. Sveising er sammenføring av materialer ved smelting. En sveisereparasjon av en korrosjonsskade foregår ved at det smeltes et sveisemateriale i sprekker eller groper for å gjøre materialet helt igjen. En annen måte å si det på er at sprekker eller groper som har oppstått på grunn av korrosjon, fylles igjen slik at materialet er like sterkt eller til og med enda sterkere enn før korrodering. På denne måten kan levetiden på material og anlegg forlenges. På olje- og gassanlegg blir det utført periodiske nedstengninger med 2-4 års intervaller. På grunn av fare for helse og miljøskader kan sveisereparasjoner av korrosjonsskader bare skje under nedstengninger og ikke mens anlegget er i drift. Et viktig mål i alle typer industri er kostnadsbesparelser. Et potensielt område for kostnadsbesparelse i olje- og gassindustrien er nettopp nedetiden rundt sveisereparasjoner av korrosjonsskader. Nedstengning av et olje- og gassanlegg fører til millioner av kroner i produksjonstap hver eneste dag, noe som indikerer at potensialet rundt disse besparelsene er store. Hva om sveisereparasjonene kunne blitt gjennomført uten nedstengninger, altså på utstyr i drift?

Konseptet "on-site repair" tar sikte på å reparere korrosjonsskader uten å måtte stenge ned anlegg. Dette er et konsept som ingen har klart å realisere. Konseptet går ut på å gjennomføre reparasjon av korrosjonsskader ved sveising på utsiden av utstyr i drift på en enkel og forsvarlig måte. HMS (helse, miljø og sikkerhet) og kostnadsbesparelser er satt i sentrum. I konseptet skal en robot, fra det danske firmaet Migatronic, gjennomføre sveisejobben. Dette eliminerer risikoen for skade på sveiser. En velprogrammert robot gjør sveiseprosessen mer stabil, effektiv, og nøyaktig enn en dyktig sveiser kan få til. Utholdenheten til roboten er også betydelig bedre. Ved reparasjon utendørs settes det opp et telt for å unngå vind. Roboten vil da kunne jobbe under kontrollerte forhold.



Alt av utstyr som er nødvendig når det skal gjennomføres en slik reparasjon i felt, skal enkelt kunne plasseres i en 10 fot container slik at transport ikke skal være noe problem, verken på land eller offshore. Roboten i seg selv veier kun 20 kg og vil være enkel å håndtere og manøvrere.

Utstyr som er i drift, som for eksempel rør og tanker, vil ha medium med kjøleeffekt på innsiden og kan ha høy veggtykkelse. Dette gjør sveiseprosessen mer komplisert da høy konveksjonsevne fører til hurtig nedkjøling i den varmepåvirkede sonen, også kalt HAZ (heat affected zone). Med høy konveksjonsevne vil det bli transportert varme bort fra sveisen. Den hurtige nedkjølingen mellom 800-500 °C for karbonstål påvirker den metallurgiske strukturen. Materialet får økt hardhet, noe som kan resultere i brudd forårsaket av sprøhet. På grunn av fluidet på innsiden vil det heller ikke være mulig å bruke vanlige etterbehandlingsmetoder i sveisesonen for å temperere materialet i ettetid. Ved temperering vil man unngå martensittdannelse, som er en hard struktur dannet i karbonstål ved rask nedkjøling. Den mest vanlige metoden for å løse dette er en sveiseteknikk kalt temper bead sveising, men det har fortsatt ikke blitt oppnådd tilfredsstillende resultater med tanke på hardhetskrav.

Denne oppgaven går ut på å identifisere andre mulige metoder eller optimalisere temper bead teknikken for å redusere hardhet i HAZ, og teste disse i samarbeid med Equinor. Målet med prosjektet er å gjennomføre sveisereparasjoner på utstyr i drift for å unngå akutt nedstengning og redusere nedetiden ved planlagte nedstengninger. Det ble identifisert en mulig metode for å etterbehandle sveis med induksjon. Denne metoden viste seg å fungere, da resultatene viste tilfredsstillende hardhetsverdier.

## 2. Teori

### 2.1. Material

I denne rapporten blir det brukt flere ulike begrep om materialer. De ulike egenskapene er viktige for forståelsen av rapporten. Dette kapittelet beskriver materialeegenskaper og begreper relatert til påvirkning av material ved sveising.

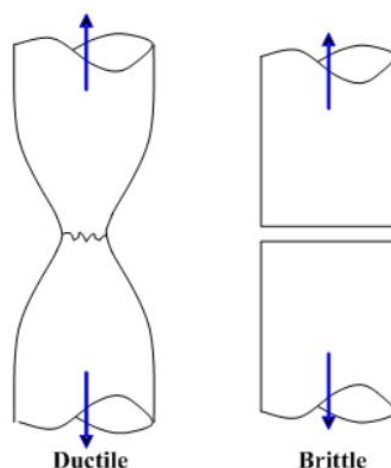
#### 2.1.1. Materialeegenskaper

##### Hardhet

Hardhet er evnen et materiale har til å motstå deformasjon ved kontakt med et annet materiale. Eksempler på slike deformasjoner er skrapemerker, inntrykk eller penetrering. Med en høy hardhet vil materialet ha en høy styrke, men vil også ha en økt sannsynlighet for at det oppstår brudd på grunn av sprøhet. Materialets styrke er evnen materialet har til å stå imot en deformasjon påført av en ekstern last. Det er derfor ønskelig med en verdi som tilsvarer nok styrke og liten sannsynlighet for sprøbrudd [1] [2] [3]. For karbonstål vil hardhetsverdier over 350 Hardhet Vickers (HV) kunne føre til sprøbrudd, og derfor er dette den kritiske verdien for hardhet [4] [5].

##### Duktilitet

Duktilitet er evnen et materiale har til å gjennomgå plastisk deformasjon uten at sprekker eller brudd oppstår. Denne evnen er en indikasjon på hvor mykt eller formbart materialet er. Med en høy duktilitet vil materialet deformeres mye før det vil oppstå sprekker eller brudd. [6] [7]. Ved et duktilt brudd vil man se en tydelig deformasjon. Dette er illustrert i Figur 1, hvor man ser forskjellen på et duktilt brudd og et sprøbrudd ved strekking.



Figur 1 - Gjengivelse av Figur i [8]. Illustrasjon av et duktilt brudd og et sprøbrudd ved strekking av to ulike materialer.

### **Sprøhet**

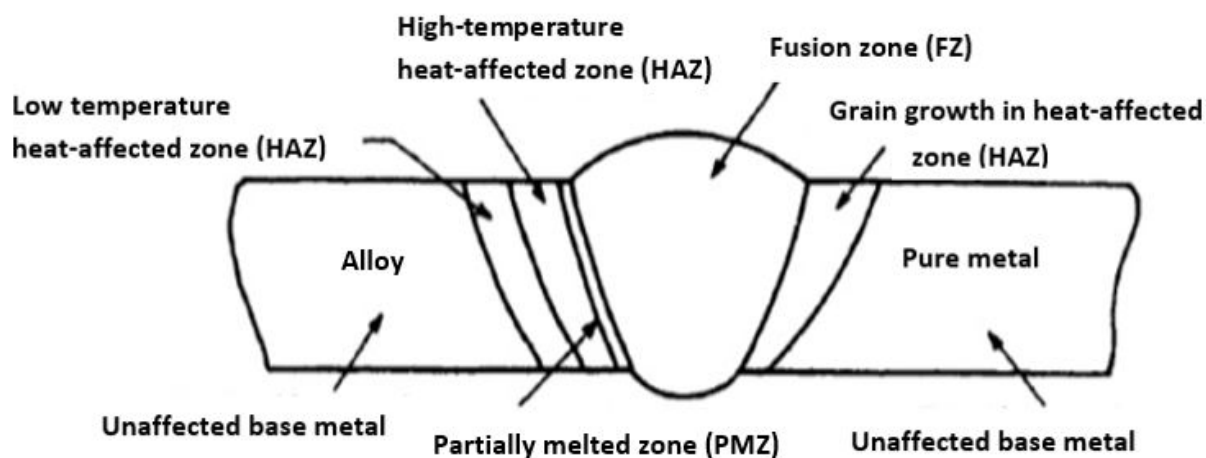
Sprøhet er det motsatte av duktilitet. Et sprøtt materiale mangler evnen til, eller viser små tendenser, til plastisk deformasjon før brudd [9]. Det som kjennetegner sprø materialer er at de lett blir ødelagt, skadet og/eller lett sprekker. De har høy trykkfasthet og lav strekkfasthet. De er med andre ord betydelig sterkere ved kompresjon enn ved strekk [10]. Etersom sprø materialer er lite sterke ved strekking, vil materialet få et rent brudd. Illustrasjonen i Figur 1 viser hvordan dette kan se ut.

### **Strekkfasthet**

Strekkfasthet er et mål på materialets evne til å motstå brudd under en situasjon hvor den blir strukket. I en slik situasjon vil materialet i et punkt gå fra elastisk deformasjon til plastisk deformasjon. I punktet der dette skjer, vil spenningene være lik strekkfastheten [11] [12]. Om det er en spenning som er mindre enn strekkfastheten, så vil materialet gå tilbake til sin opprinnelige størrelse og form når denne spenningen fjernes. Utsettes materialet for spenninger som overstiger strekkfastheten, vil materialet få en plastisk deformasjon der materialet enten får et duktilt brudd eller et sprøbrudd [12] [13].

## **2.1.2. Heat affected zone**

Under sveising skapes det mye varme som fordeler seg i området rundt selve sveisen. Det området i grunnmetallet som blir varmpåvirket under sveisingen kalles for den varmpåvirkede sonen, eller Heat Affected Zone (HAZ). HAZ ligger mellom hovedmaterialet som blir sveiset, og smeltesonen hvor sveisebadet til sveisen ligger. Grensen mellom sveisen og HAZ heter smeltegrensen, og er grensen mellom der smeltebadet og grunnmetallet møtes. Selve HAZ består av metall som ikke er smeltet, men som har blitt påvirket av energipåkjenningen ved sveising. Videre kan man bryte HAZ ned i flere soner etter grad av påvirkning. Nærmest sveisen er kornvekstsonen, deretter den rekrystalliserte sonen, etterfulgt av den delvis transformerte sonen og til slutt den tempererte sonen [6]. Utenfor disse sonene kommer resten av det upåvirkede hovedmaterialet. De forskjellige sonene er illustrert i Figur 2.



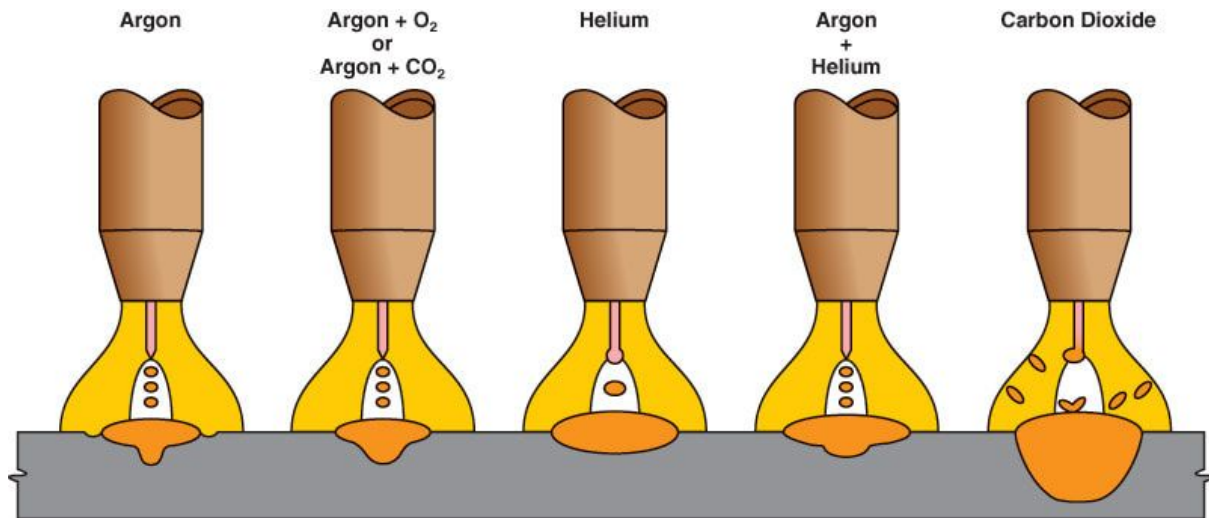
Figur 2 - Tilpasning av Figur side 40 i [14]. De forskjellige sonene i HAZ.

HAZ blir ikke direkte påvirket av selve sveisen, men har fått så stor varmepåvirkning under sveisingen at mikrostruktur og egenskaper har forandret seg. Denne påvirkningen vil i stor grad være avhengig av metallet som blir sveiset. Den termiske diffusiviteten er avhengig av den termiske ledningsevnen og avgjør hvor godt et metall kan lede varmen som blir påført. Materialer som har høy termisk diffusivitet vil avkjøles raskere og får en mindre HAZ. Materialer med lav termisk diffusivitet vil holde på varmen lengre og får en større HAZ. Størrelsen på HAZ vil variere med mengden varme som tilføres, varigheten av varmeeeksponering og egenskapene til selve materialet. Når et materiale tilføres varme over lengre tid, vil HAZ bli større. Om et høyt temperert stål blir utsatt for veldig hurtig nedkjøling vil det bli en herding i HAZ som følge av dannelse av den harde mikrostrukturen martensitt. Forandringene som skjer i HAZ vil føre til at området blir svakere enn grunnmetallet. Dette gjør at HAZ ofte er et område hvor sprekkdannelse og brudd oppstår [15].

### 2.1.3. Innbrenning

Innbrenning er dybden fra overflaten til materialet som sveises og ned til smeltegrensen i bunnen av sveisebadet [16]. Innbrenning er en kritisk faktor for strukturell integritet i materialet [17]. Det har blitt observert at strømstyrken ved sveising har sterkest påvirkning på innbrenning [18] [19]. Innbrenning øker med økende strømstyrke, tråddiameter eller buespenning. Dekkgassen som blir brukt, påvirker også hvordan innbrenningen blir. De ulike gassene har egenskaper som har innflytelse på både dybde, form og temperatur. Gassblandinger brukes for å oppnå ønsket innbrenning. Ar+5-25%CO<sub>2</sub> blir hyppig brukt på grunn av god kontroll på innbrenning, god produktivitet og en mer stabil lysbue [20] [21].

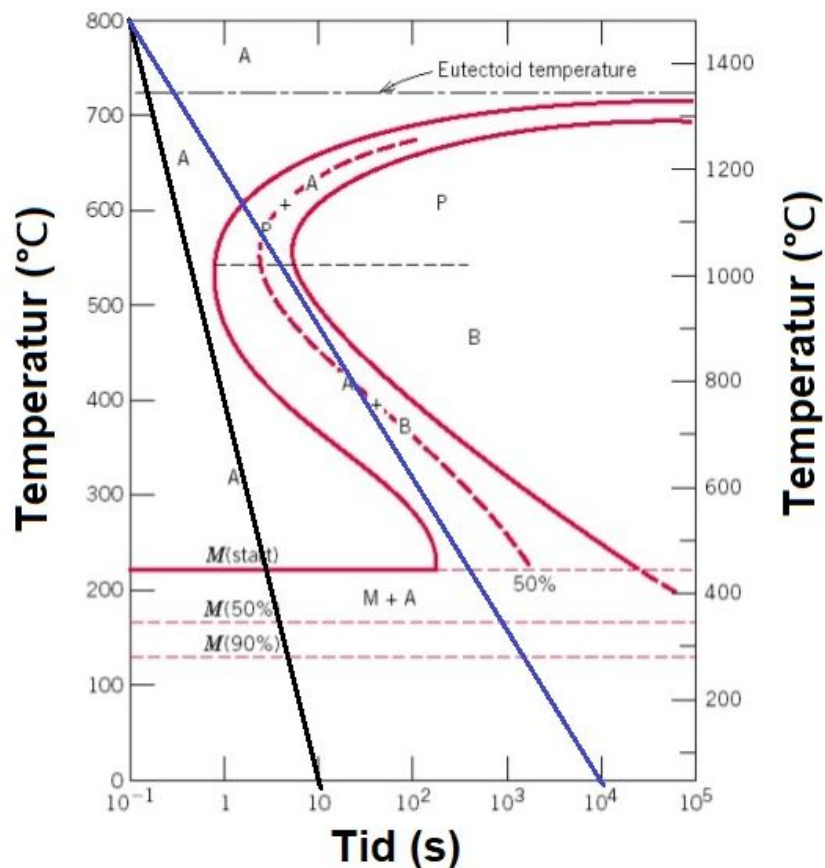
Figur 3 viser typiske innbrenninger med ofte brukte gasser og gassblandinger innenfor sveising. Blandingen med Ar+CO<sub>2</sub> får en innbrenning som hverken er veldig dyp eller bred, men som kan justeres med blandingsforhold. Det må gjøres nøyaktige undersøkelser ved valg av sveiseparametre før sveising på tynne deler. I verste fall kan sveising gi så mye innbrenning at det brenner helt gjennom materialet.



Figur 3 - Gjengivelse av Figur 7-41 i [22]. Illustrasjon av hvordan innbrenning kan variere kvalitativt, avhengig av gassblandingen som brukes.

#### 2.1.4. Nedkjølingstid

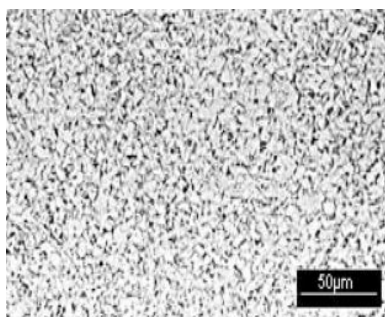
Nedkjølingstid er kritisk for de metalliske egenskapene etter sveiseprosessen. For karbonstål og lavlegerte stål er den mest kritiske perioden for nedkjølingstiden i HAZ mellom 800 og 500°C. Denne nedkjølingstiden er definert som verdien  $t_{8/5}$ , som er tiden mellom disse temperaturene. Nedkjølingstiden er relatert til nedkjølingshastigheten (°C/s) [23]. Nedkjølingstiden vil avgjøre mikrostrukturen og de mekaniske egenskapene til både sveisemetallet og HAZ. Lav  $t_{8/5}$  er en rask nedkjøling som fører til høyere hardhet i sveisen, og dermed større mulighet for sprekke dannelse. Høy  $t_{8/5}$  er en sakte nedkjøling som fører til en reduksjon i hardhet. Variabelen som har størst innvirkning på nedkjølingstiden er varmetilførselen [23] [24] [25]. Varmetilførselen er direkte proporsjonal med strømmen og lysbuespenningen. Den er også omvendt proporsjonal med sveisehastigheten. Mer utdypende teori om varmetilførsel og sveisehastighet er å finne i kapittel 2.4.1 [24].



A - austenitt, P - perlitt, B - bainitt, M - martensitt

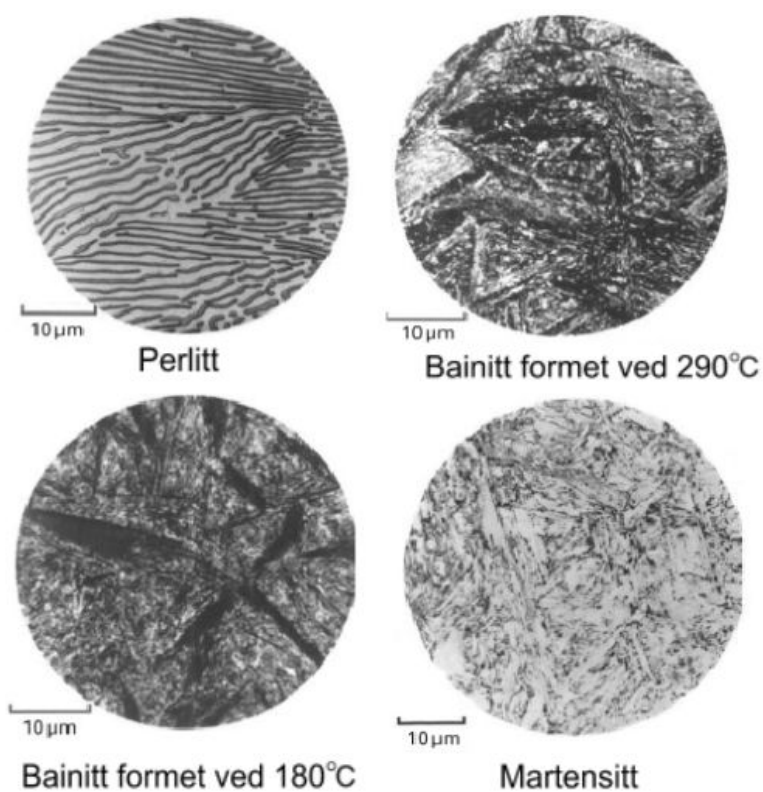
Figur 4 - Tilpasning av Figur på side 45 i [26]. Fasediagram for stål.

Når et stål blir oppvarmet og bråkjølt vil dette føre til martensittdannelse. Studier har vist at hardhet først og fremst blir redusert av martensitt-nedbrytning [27]. Oppvarming av stål vil først føre til dannelse av mikrostrukturen austenitt, som blir utgangspunktet før man ser på nedkjøling. Med en langsom nedkjøling, vil perlitt bli dannet. Dannelsen av denne strukturen foregår ved diffusjon, og den må derfor ta tid. Moderat nedkjøling vil typisk føre til dannelse av bainitt. Hvis stålet avkjøles så raskt fra austenittområdet at diffusjonen ikke får tid til å finne sted, tvinges austenitten brått ned til en lavere temperatur. Det er her austenitt omdannes til martensitt [12] [28]. I Figur 4 er det lagt inn to ulike linjer som illustrerer to eksempler på forløp i fasediagrammet. Den svarte linjen (linjen til venstre) viser en nedkjølingshastighet som fører til martensittdannelse. Den blå linjen (linjen til høyre) viser en ønsket nedkjølingshastighet som vil bidra til en akseptabel hardhet og liten risiko for sprøbrudd. Hvordan de typiske strukturene ser ut i mikroskop, vises i Figur 5 og 6.



Figur 5 - Gjengivelse av Figur i [29]. Ferrittisk mikrostruktur.

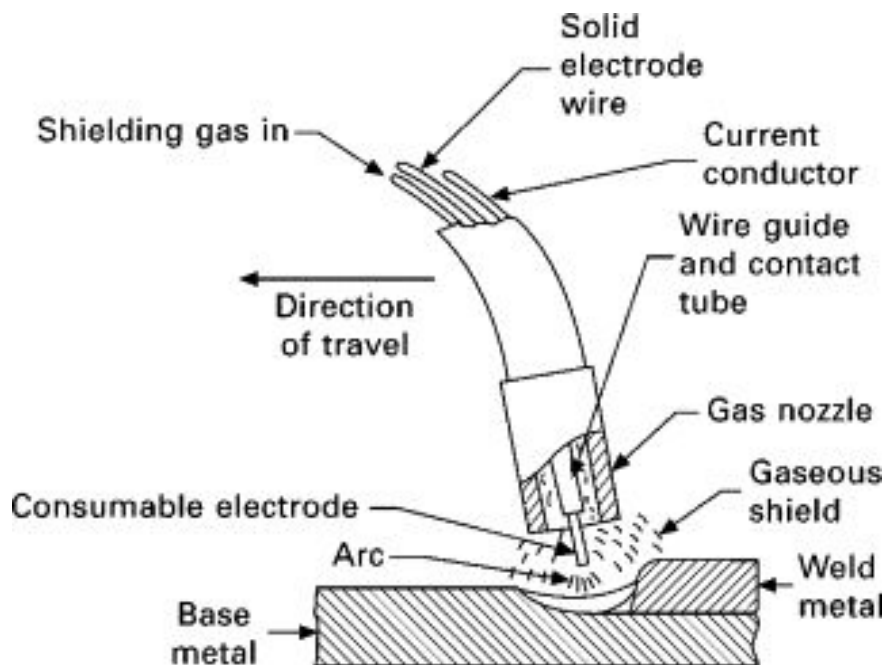
Som vist i Figur 6 består perlitt av tynne skiver. Ferrittisk mikrostruktur er en blanding av både ferritt og perlitt.



Figur 6 - Tilpasning av Figur 6.5 i [30]. Fire ulike mikrostrukturer typisk oppnådd etter nedkjøling av stål.

## 2.2. Gas Metal Arc Welding

Metal Inert Gas (MIG) og Metal Active Gas (MAG) er begge sveiseteknikker som går under Gas Metal Arc Welding (GMAW). GMAW går ut på å sende elektrisk strøm gjennom et tilsettmateriale for å skape en elektrisk lysbue mellom tilsettmaterialet og grunnmetallet slik som vist i Figur 7. Varmen fra lysbuen får tilsettet til å smelte og skaper et sveisebad med metall som kjøles ned til fast form og danner en sammenføyning. Tilførsel av tilsett skjer automatisk ved at tilsettet blir matet gjennom kontaktpissens på sveisepistolen fra en trådmatingsspole. Dekkgassen blir tilført gjennom sveisebrenneren. De eneste forskjellene mellom MIG og MAG er hvilken type gass og forbruksmetall som blir tilført sveisebadet. Gassen som blir tilført har stor innvirkning på egenskapene til sveisebadet, spesielt når det kommer til innbrenning og mekaniske egenskaper [31].



Figur 7 - Gjengivelse av Figur 8.4 i [32]. Illustrasjon av GMAW.

MIG er en sveiseprosess hvor det brukes inerte gasser som dekk-gass. Denne sveiseprosessen brukes når det skal sveises metaller som ikke inneholder noen nevneverdige mengder med jern, slik som aluminium og andre typer metalliske blandinger med mindre enn én vektprosent jern. Disse gassblandningene består typisk av argon og helium, som vil bestemme innbrenning og viskositeten til sveisebadet. Viskositeten vil være viktig for sveising som foregår vertikalt og opp ned siden gravitasjon vil trekke på sveisebadet. Væsker med lav viskositet flyter lettere enn væsker med høy viskositet [33].



MAG bruker aktiv dekk-gass, og brukes som regel for sveising av jernholdige metaller som for eksempel stål. Dekkgassene som ofte brukes er en blanding mellom argon, karbondioksid og oksygen. Forholdet mellom gassene justeres i forhold til metallet som skal sveises for å redusere uønskede effekter. MAG har den fordelen at det kan sveises på vertikale flater og opp-ned, noe som ikke kan gjøres med MIG. Dette gjør at både MIG og MAG må gjøres under relativt kontrollerte forhold siden mye vind vil føre til at gassen blåser bort og sveisebadet vil bli utsatt for oksidasjon, som videre vil føre til dannelse av slagg. Slagg er en blanding av oksider, silikater og andre forbindelser som fremkommer under smelting av metaller under sveising. Slagg vil flyte på toppen av sveisebadet og vil beskytte mot oksidering, men vil være en ulempe å ha mellom to sveisestrenger [34].

Et tilsett som ofte brukes for GMAW er kompakttråd. Kompakttråd er vanlig for bruksområder som spenner fra generell fabrikasjon og produksjon, til reparasjon og rørledningssveising. Kompakttråd er brukervennlig i den forstand at sveisingen kan skje i et bredt spekter av situasjoner og ved ulike tykkelser. Kompakttråd avgir ikke slagg og gir derfor en ren sveis. Kompakttråd er en heltråd uten noe lag med legering eller andre midler som skal hjelpe til i sveisingen [35].

### **2.3. Temper bead**

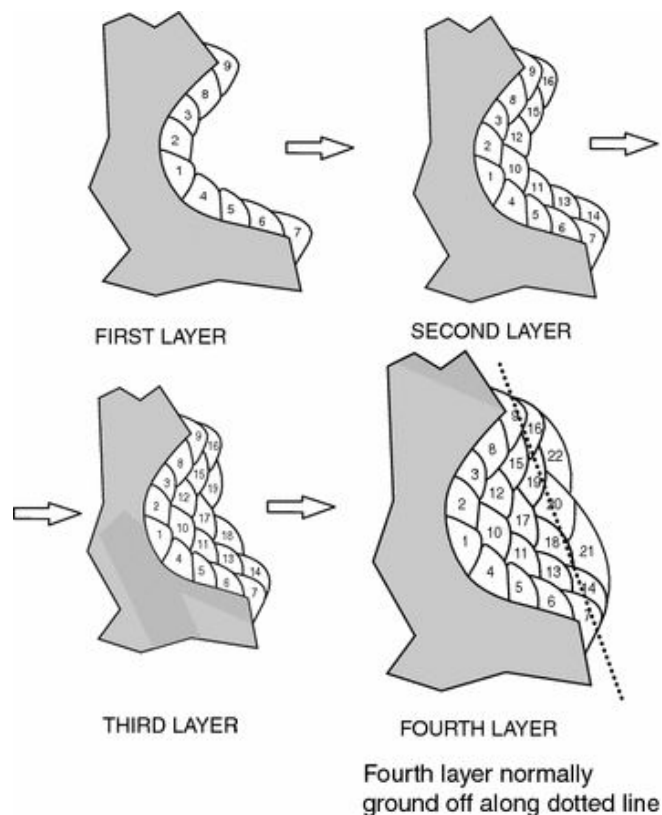
Temper bead sveising, også kalt tempererings-sveising, er en mye brukt sveiseteknikk innenfor kjernefysisk industri for sveisereparasjoner i felt, hvor klassisk PWHT med direkte kontakt ikke er mulig eller praktisk å gjennomføre. Varmetilførselen gjennom «temper beads», også kalt anløpningsstrenger, er rettet mot det å temperere den harde mikrostrukturen i HAZ eller tidligere anløpningsstrenger for å redusere hardhet [36].

The American Society of Mechanical Engineers (ASME) definerer “temper bead” på følgende måte:

*“Temper bead welding: a weld bead placed at a specific location in or at the surface of a weld for the purpose of affecting the metallurgical properties of the heat-affected zone or previously deposited weld metal. The bead may be above, flush with, or below the surrounding base metal surface. If above the base metal surface, the beads may cover all or only part of the weld deposit and may or may not be removed following welding.” [37]*

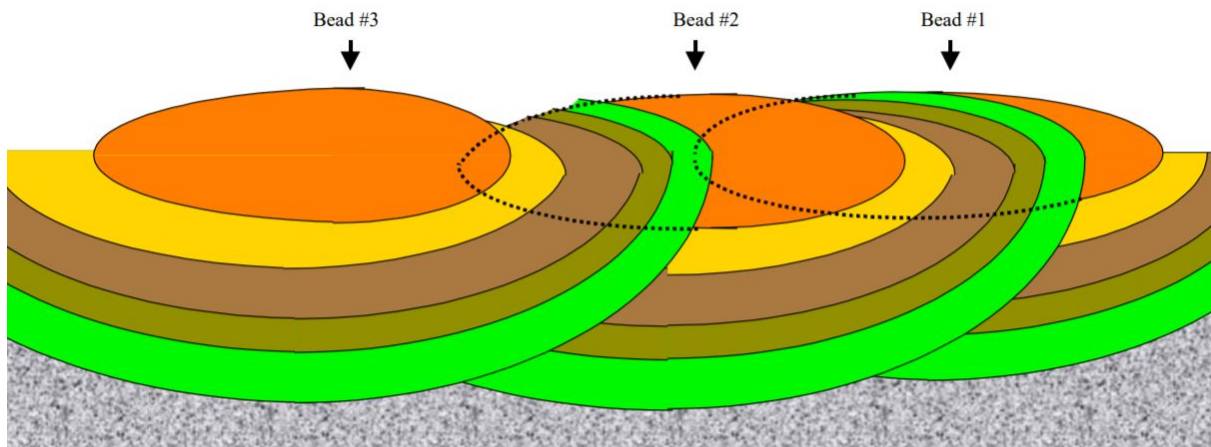
HAZ blir laget av den første av to påfølgende strenger og temperert ved å kontrollere varmetilførselsforholdet mellom de to strengene. De siste passeringene av anløpningsstrenger kan være i en utemperert tilstand, men dette løses ved at de slipes bort etter at de har temperert strengene under.

Tanken bak teknikken er å manipulere en standard sveiseprosess på en slik måte at varmen fra en streng kan brukes til å temperere den metallurgiske strukturen til tidligere strenger, og dermed oppnå strukturen som vanligvis oppnås ved etterbehandlingsmetoder. Teknikken innebærer å kontrollere metallurgiske transformasjoner. Dette kan gjøres ved å bruke forskjellige størrelser på tilsett, plassere strenger med et overlapp, variere varmetilførsel og endre andre parametre relatert til sveiseprosessen [38].



Figur 8 - Gjengivelse av Figur 2 i [39]. Temper bead sveising med fire lag.

Figur 8 viser hvordan en temper bead sveiseprosess foregår. I denne figuren er det tatt utgangspunkt i fire lag. For hvert lag er det dokumentert at varmetilførselen burde økes med 30-70% [40]. Når det har blitt sveiset ett lag, vil materialet tåle mer varmetilførsel uten at det forekommer mer innbrenning i grunnmaterialet på grunn av den økende tykkelsen hvert lag tilfører. I figuren tilsvarer tallene 1-9 første lag, 10-16 andre lag, 17-19 tredje lag og 20-22 fjerde lag med sveis. Strengene er markerte med ulike tall på grunn av at det er ulike sveiseparametre for hver enkelt streng. Store deler av det siste laget slipes typisk langs linja vist på figuren, ettersom dette laget ikke vil være temperert [39].



Figur 9 - Gjengivelse av Figur 2 i [36]. Anløpning av tidligere strenger.

Figur 9 viser at deler av sveisematerialet og tilhørende HAZ til den første strengen blir temperert av varmen fra den andre strengen. Det oppstår høyest hardhet ved grensen mellom smeltesonen og HAZ, altså de to innerste sonene. Om den andre strengen overlapper den første strengen i stor grad, så vil store deler av den første strengen sin HAZ bli temperert av den andre. Om den tredje strengen overlapper den andre litt, så vil lite av HAZ for den andre strengen bli temperert [36] [38]. Det er observert at 50-75% overlapp gir best temperering og hardhetsreduksjon [41].

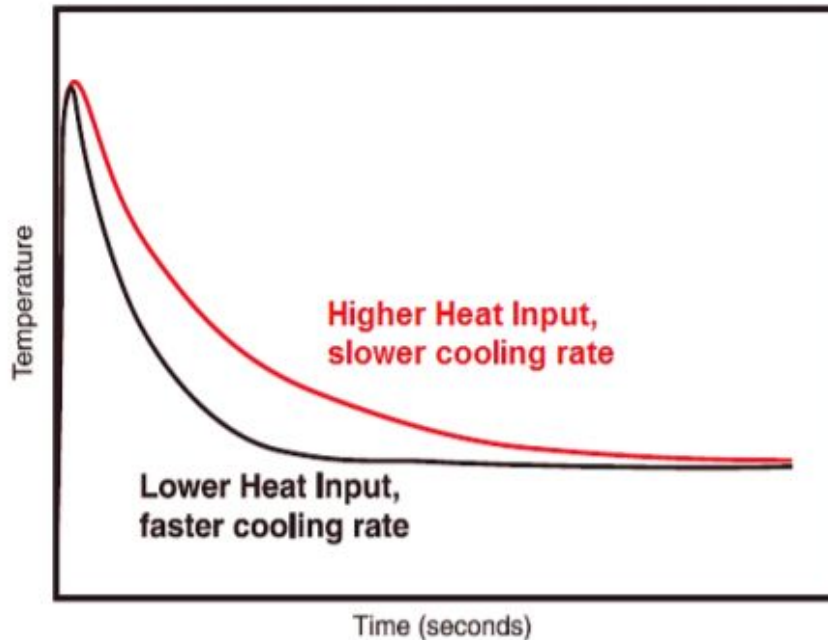
## 2.4. Sveiseparametre

### 2.4.1. Varmetilførsel

Med varmetilførsel forstås den elektriske energien som blir levert av sveisebuen til arbeidsstykket jf. definisjonen i [42]. Varmetilførselen styres av elektrisk spenning mellom lysbue og arbeidsstykke, total strømstyrke i lysbuen samt sveisehastigheten. Varmetilførsel uttrykkes med kilojoule per millimeter (kJ/mm) [43]. Ved lysbuesveising beregnes varmetilførselen ut ifra produktet av lysbueenergien og den termiske effektivitetsfaktoren til lysbuen, som typisk er mellom 0,6 og 0,8. Denne faktoren forteller hvor mye av lysbueenergien som tilfører varme i sveisen.

Sveisehastigheten, gitt i millimeter per sekund (mm/sek), spiller en stor rolle for varmetilførselen. Med økende sveisehastighet vil både bredden og dybden i HAZ bli redusert [44]. Dette kommer som et resultat av at det totalt sett blir tilført mindre varme i sveisen og dermed mindre innbrenning. Det vil dermed være mindre tid for lysbuen til å tilføre varme per millimeter med sveising. Ved sveising på et tynt materiale, vil det derfor være nødvendig med høyere sveisehastighet for å unngå gjennombrenning. Lav sveisehastighet fører derimot til en bredere og dypere innbrenning på grunn av at varmetilførselen i sveisen blir høyere [45].

Årsaken til at varmetilførsel ofte er kritisk er på grunn av dens store betydning for nedkjølingshastigheten og nedkjølingstiden [46]. Sveising på seksjoner av materialer med god varmeledningsevne, men med lite varmetilførsel kan føre til at sveiseområdet avkjøles for raskt, og forårsaker høye hardhetsverdier i HAZ [43] [47].



Figur 10 - Gjengivelse av Figur 1 i [48] Sammenheng mellom varmetilførsel og nedkjølingshastighet.

Den grunnleggende tankegangen bak varmetilførsel ved sveising er at når den øker, så vil temperaturen øke og nedkjølingshastigheten minke. Sammenhengen er illustrert i Figur 10. Som følge av den økte varmetilførselen vil det bli mer innbrenning, og det vil være viktig å identifisere hvor mye varme som kan tilføres før det er fare for gjennombrenning. Med en redusert nedkjølingshastighet vil stål få en hardhetsreduksjon. Effekten av å redusere nedkjølingshastigheten er at harde og sprø faser som for eksempel martensitt, kan unngås [47] [49].

### 2.4.2. Gassblanding

Dekkgass i sveising blir brukt for å beskytte sveisebadet fra atmosfærisk påvirkning og andre urenheter. Oksygen, nitrogen og vanddamp er tilstede i atmosfæren, og kan forårsake urenheter i sveisen. Dekkgassen hindrer interaksjon mellom sveisebadet og luft. De ulike gassene har også en påvirkning på lysbuens struktur og stabilitet. De mekaniske egenskapene til grunnmaterialet i smeltesonen vil også bli påvirket av dekk-gassen. To av disse viktige egenskapene er hardhet og korrosjonsbestandighet [50].

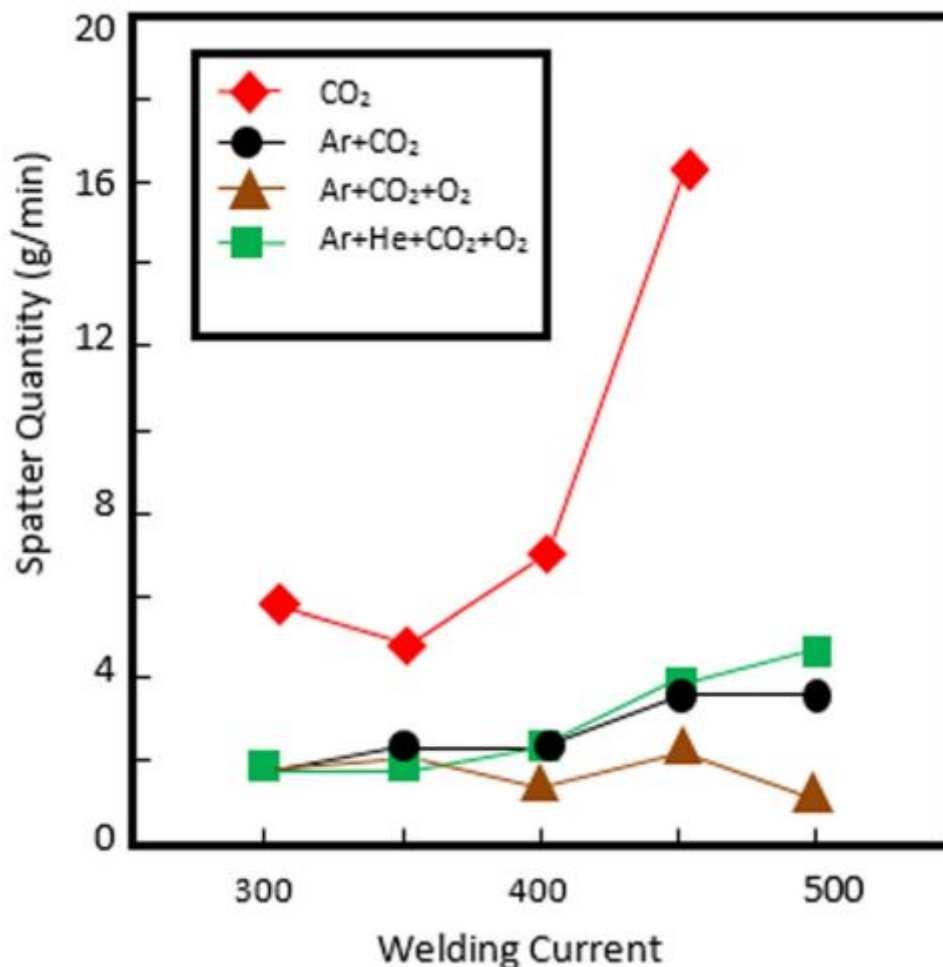
Tabell 1 - Tilpasning av Tabell 1 i [51]. Kjemiske- og fysikalske egenskaper til gasser brukt ved sveising.

Shielding gases	Density at 15 °C 1 bar (kg/m <sup>3</sup> )	Chemical activity	Observations
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	0,085	Reducing	- High thermal conductivity - Its addition can increase heat input
Oxygen (O <sub>2</sub> )	1,337	Oxidizing	- Its addition stabilizes the arc and reduces surface tension
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	1,849	Oxidizing	- Its addition results in wider and deeper bead penetration - Causes high amount of spatter - Restricted to short arc metal transfer
Helium (He)	0,167	Inert	- Used when increased heat input is desired - Improved wetting action, penetration, travel speed
Argon (Ar)	1,669	Inert	- Good starting arc and arc stability - Widely used in welding - Finger-like penetration

Helium, argon, hydrogen, karbondioksid og oksygen er de vanligste gassene som blir benyttet som dekk-gass under sveising. Helium og argon er inerte gasser som ikke reagerer med sveisebadet. Hydrogen er en reduserende gass, mens oksygen og karbondioksid er oksiderende gasser. For sveising på stål ved GMAW er hydrogen og nitrogen lite relevant. Hydrogen burde unngås for å hindre hydrogensprøhet, som videre kan føre til sprøbrudd. Det er derfor svært begrenset bruk av hydrogen i gassblandinger [51]. Helium er en gass som hovedsakelig blir brukt sammen med argon på aluminium eller rustfritt stål. Heliumet bidrar til bredere innbrenning og gir mulighet for høyere avsetningshastighet. På karbonstål brukes helium i en gass som består av flere komponenter [50].

Dekkgassen består av enten en-komponentgass eller flerkomponent-gass. flerkomponent-gasser består av to eller flere gasser blandet sammen. En-komponentgasser kan ofte gi akseptable resultater, men en blandingsgass er nødvendig for å oppnå best mulig resultat [51].

Ved GMAW på karbonstål benyttes  $\text{CO}_2$  som dekk-gass, enten som en en-komponentsgass eller i en gassblanding med andre gasser.  $\text{CO}_2$  er en billig gass som gir høy avsetningshastighet samt en dypere og bredere innbrenning i grunnmaterialet. Det er forøvrig begrensninger ved å bruke 100%  $\text{CO}_2$  som dekk-gass [50]. utfordringer med å bruke ren  $\text{CO}_2$  er blant annet mye sprut fra sveisebadet og stort materialtap som følge av oksidasjon. For å redusere dette blandes  $\text{CO}_2$  med argon. Dette gir mindre oksidering av grunnmetallet og mindre sprut under metalloverføringen, som vist i Figur 11 [52].



Figur 11 - Gjengivelse av Figur 10 i [51]. Sprut ved bruk av ulike dekk-gasser som en funksjon av strømstyrke.

Gassblandinger med svært lite eller ingen oksiderende gass har dårlig lysbue- og sveisestregkaraktistikk. Lysbuen vil bli ustabil og det vil føre til mer sprut. Det er derfor viktig å ha minimum 1% oksiderende gass i blandinger med argon [52]. De vanligste gassblandinger som blir brukt for MAG sveising er en Ar/ $\text{CO}_2$  blanding med 5-25 %  $\text{CO}_2$  innhold. Disse er kosteffektive og billige gassblandinger som gir en bedre kvalitet på sveis, enn ved bruk av ren  $\text{CO}_2$  [51].

CO<sub>2</sub> kan substitueres med O<sub>2</sub> som aktiv gasskomponent for å unngå karbontilførsel i sveiseavsettet. Gassblandinger med mindre enn 10% CO<sub>2</sub> vil derimot få innbrenning som en typisk argon-innbrenning, vist tidligere ved Figur 2 [52]. Ved å øke mengden CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> i gassblandingen ved sveising av lavlegert stål og karbonstål, får man en økt forbrenning av legeringselementer i stålet. Silikon og mangan er eksempler på stoffer som blir påvirket av denne effekten. Resultatet av denne forbrenningen vil være en økt strekkfasthet og hardhet. Utmattelsesstyrken til stålet vil bli redusert som følge av den økte mengden oksider som blir introdusert i metallet. Ved å redusere CO<sub>2</sub>- og O<sub>2</sub>-innholdet i gassblandingen blir mikrostrukturen i stålet mer finkornet, og mengden oksider i sveiseavsettet blir redusert [51].

## **2.5. Alternativ etterbehandling**

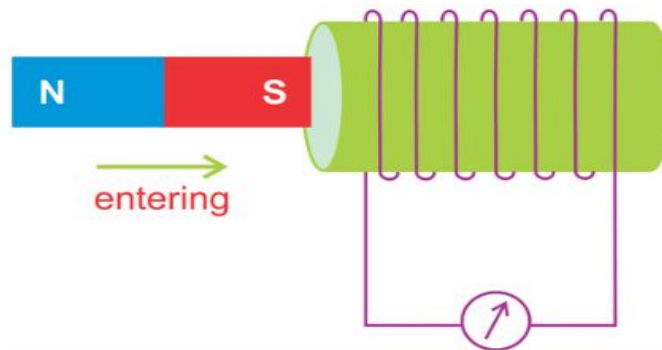
### **2.5.1. Post weld heat treatment**

Under sveising vil det oppstå så høy varme at det vil forekomme endringer i grunnmaterialet som kan ha stor innvirkning på materialets strekkfasthet, hardhet, og duktilitet. PWHT er en prosess som brukes for å forsikre at mest mulig av styrken til materialet blir beholdt etter sveising. Dette gjøres ved å redusere restspenninger som vil oppstå under sveisingen. Faren ved restspenninger er at disse, sammen med last spenninger, kan overskride materialets begrensninger og føre til brudd og korrosjon. PWHT skjer ved at et materiale blir varmet opp til en temperatur som er under den kritiske transformasjonstemperaturen til materialet. Den vil holdes der til det skjer en termodynamisk faseovergang. For stål er dette hvor man får dannelse av austenitt. Deretter holdes temperaturen i en spesifikk tid før den blir senket på en kontrollert måte. Dette vil øke duktiliteten og redusere hardheten i HAZ. For stål blir PWHT brukt i hovedsak for spenningsavlastning og reduksjon av hardhet [53].

### **2.5.2. Induksjon**

Induksjon er det å frembringe elektrisk strøm i en leder ved påvirkning fra magnetisme eller fra elektrisk strøm i en annen leder [54]. For induksjon er det helt avgjørende at man har varierende magnetfelter. Et varierende magnetfelt vil indukere en elektromotorisk kraft på ladningsbærere i en strømsløyfe som er proporsjonal med endringen i magnetisk fluks gjennom strømsløyfen [55] [56]. Endringen i magnetisk fluks beskriver endringen i antallet magnetiske feltlinjer. Det finnes flere typer induksjon: Elektromagnetisk induksjon, elektrostatisk induksjon og magnetisk induksjon. I dette tilfellet er det elektromagnetisk induksjon som er av mest interesse da bruksområdene er flere og effektiviteten bedre [57].

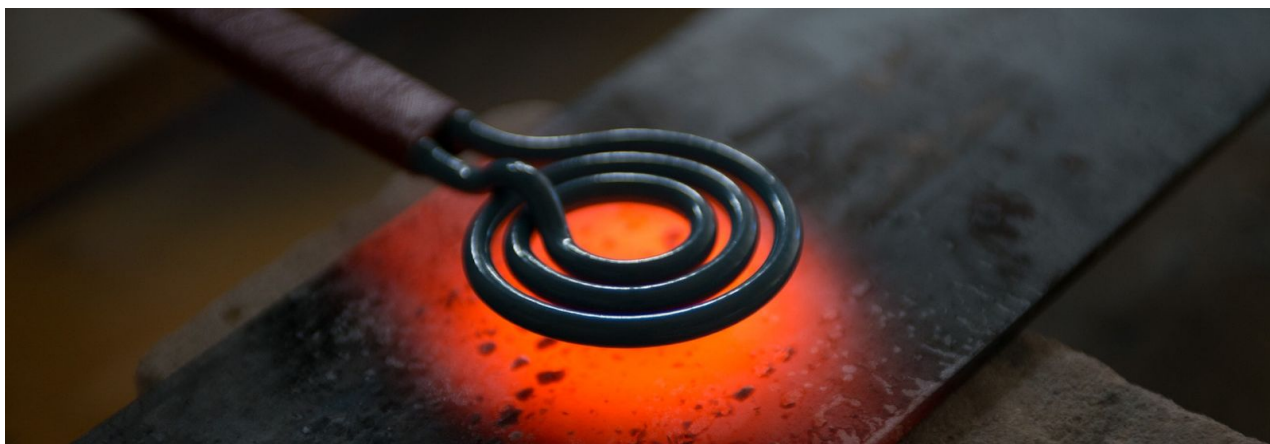
Elektromagnetisk induksjon er å lage elektrisk spenning i en elektrisk krets ved å endre magnetfeltet omsluttet av kretsen eller ved å bevege kretsen i et magnetfelt, slik som vist i Figur 12. Hvis en elektrisk ledning beveges gjennom et magnetfelt, vil en strøm genereres i ledningen. Hvis denne ledningen er ringformet eller spiralformet, kan retningen styres og konsentreres [56]. Elektromagnetisk induksjon binder dermed sammen elektrisitet og magnetisme, og er svært viktig i anvendelser ved dagens teknologi. Eksempler på slike anvendelser er generatorer, transformatorer og andre elektroniske komponenter [57].



Figur 12 - Gjengivelse av Figur i [58]. Generering av strøm ved endring i magnetfelt.

Induksjonsoppvarming er en prosess som brukes til å binde, herde eller myke opp metaller eller andre varmeledende materialer. For mange moderne produksjonsprosesser tilbyr induksjonsvarme en attraktiv kombinasjon av hastighet, stabilitet og kontroll. Induksjonsvarme er avhengig av de unike egenskapene til radiofrekvensenergi, altså den delen av det elektromagnetiske spekteret som representerer infrarød energi og mikrobølgeenergi. Med dagens induksjonsteknologi kan parameterne optimaliseres for å gi ønskede resultater. Figur 13 viser et materiale som varmes av en induksjonsspole. Siden varme overføres til produktet via elektromagnetiske bølger, kommer delen aldri i direkte kontakt med produktet. Induktoren i seg selv blir ikke varm. Når den er riktig konfigurert, blir prosessen enkel å både repetere og kontrollere [59].





*Figur 13 - Gjengivelse av Figur i [60]. Eksempel på hvordan induksjon kan varme materialer.*

Ved å påføre en høyfrekvent vekselstrøm på en induksjonsspole genereres et tidsvarierende magnetfelt. Spolen blir tilført en effekt, som er produktet av strøm og spenning. Materialet som skal varmes opp plasseres inne i magnetfeltet uten å røre spolen. Merk at ikke alle materialer kan varmes opp ved induksjon, kun de med lav elektrisk ledningsevne. Det vekslende elektromagnetiske feltet induserer virvelstrømmer i arbeidsstykket som deretter varmer opp materialet. Denne metoden for oppvarming er veldig effektiv, ettersom varmen genereres inne i arbeidsstykket. For å øke spolens varmeeffektivitet, bør avstanden mellom spolen og arbeidsstykket minimeres. Effektiviteten avtar med økende avstand [61]. Med induksjonsvarme unngås varmetap fra overflatene som vil være en elektrisk forbindelse. Induksjonsvarme gir derfor en bedre varmeeffektivitet [62].

### 3. Materialer og metoder

#### 3.1. ASTM SA 516 Gruppe 70 stål

Stålet som ble testet i denne oppgaven er ASTM SA 516 Gruppe 70 stål, typisk brukt for rør og beholdere i olje- og gassbransjen. Platen som ble brukt var 6 mm tykk. Variasjonen i materialsammensetning, gitt av Equinor, er vist i Tabell 2. Karbon- og manganinnhold varierer mye, noe som påvirker hvordan stålet reagerer under oppvarming. Flytespenningen til stålet er 260 MPa, og strekkfastheten til stålet ligger mellom 485-620 MPa.

*Tabell 2 - Variasjonen i materialsammensetning, gitt av Equinor*

Material	C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ni	B
Høy C/høy Mn	0,22	0,3	1,7	0,3	0,02	0,08	0,3	0
Lav C/lav Mn	0,1	0,3	1,0	0,3	0,02	0,08	0,3	0

For testen ble det brukt en plate med lavt karboninnhold i forhold til standard A516 Gruppe 70 stål. Sammensetningen til sveiseprøven er vist i Tabell 3.

*Tabell 3 - Materialsammensetningen til sveiseprøven*

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
0,096	0,24	1,41	0,01	0,004	0,024	0,017	0,003	0,02	0,041

## 3.2. Testing

### 3.2.1. Sveiseprosessen

Den foretrukne sveisemetoden for testen var MAG. Figur 14 viser oppsettet ved sveiseprosessen. På baksiden av platen var det et kar fylt med vann for å simulere et rør med fluid på innsiden.



Figur 14 - Robot med sveisepistol

Det ble valgt å sveise med kompakttråd av typen OK Autrod 12.51, med 1 mm tykkelse. Innholdet i tilsettet, gitt av Equinor, vises i Tabell 7. Den anvendte gassen var Teral 22. Gassen inneholdt 91% Ar, 4% He, 3% CO<sub>2</sub> og 2% O<sub>2</sub> [63].

Tabell 4 - Innhold i tilsett

Tilsettmateriale	C	Si	Mn
OK Autrod 12.51 <sup>1</sup>	0,08	0,83	1,47

<sup>1</sup> Restene i kompakttråden er neglisjerbare. Restene tilsvarer 0,1% Nb, 0,02% V og 0,02% av Cr, Ni, Mo og Cu.

Tabell 5 - Oversikt over sveiseparametre.

Prøve	Medium bakside	Antall strenger	Offset	Lengde sveis	Strøm	Spenning	Sveise hastighet	Heat input	Trådmating	Gass Flow
X0	Vann 18 gr.C	6 stk	5 mm	60 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X1	Vann 18 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X2	Vann 18 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X3	Vann 18 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X4	Vann 26 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X5	Vann 26 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X6	Vann 26 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X7	Vann 34 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X8	Vann 34 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min
X9	Vann 34 gr.C	6 stk	5 mm	120 mm	120 A	23,8 V	6 mm/sek	0,47 kJ/mm	5,7m/min	9,2 l/min

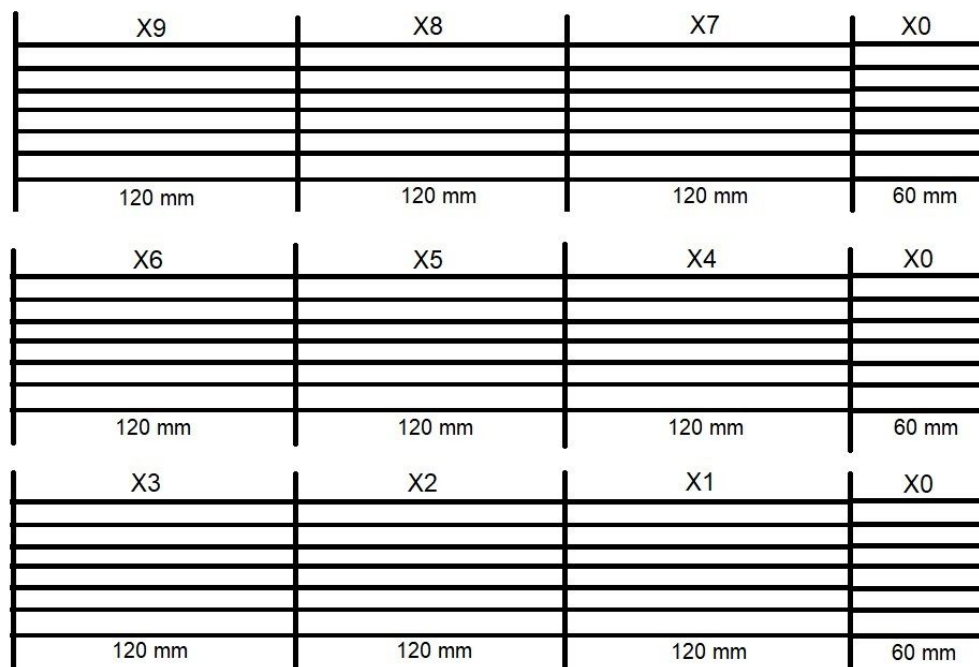
Det ble sveiset med vann i et kar på baksiden av platen for å forårsake et hardhetsproblem grunnet kort nedkjølingstid. Tabell 5 viser tre sveisefelt der det er sveiset med de samme parametrene. Underveis ved sveising ble det registrert en økning i temperatur i vannet på baksiden av platen. For å få mest mulig presise resultater videre ble det ordnet slik at vannet i tanken bak testplaten sirkulerte. Dette ble gjort for å holde temperaturen til vannet mest mulig stabilt gjennom alle testene. Det var for alle de tre sveisefeltene 60 mm på starten av hvert felt som ble satt av som referansesoner.

### 3.2.2. Varmebehandling med induksjonsspole

Hovedfokusert ved denne testen var å teste varmebehandling med induksjonsspole og dens påvirkning på mikrostrukturen til sveisen og HAZ. Induksjonsspolen som ble brukt var ikke designet for denne testen, men ble brukt for å teste metoden. Figur 15 viser induksjonsspolen montert på robotarmen. Til høyre er spolen i aksjon.



Figur 15 - Robot og induksjonsspole.



Figur 16 - Illustrasjon av testplan der X0-X9 representerer ulike prøver med ulik effekt tilført av induksjonsspole.

Den generelle testplanen er illustrert i Figur 16. Alle de tre feltene er helt like før varmebehandling. Figuren viser planen videre i form av ulike effekter tilført av induksjonsspolen. Den viser tre felt som består av fire soner og som har seks horisontale sveisestrenger. Sonene som er merket X0 ble ikke varmebehandlet og vil derfor være lik i hvert felt.

Det ble utviklet en testplan ved nøye testing av hastigheter kombinert med ulike effekter. Figur 16 viser sveisefeltene og hvor de ulike prøvene skal være, og Tabell 6 viser hvordan den endelige testplanen ble og hvilke hastigheter og effekter spolen ble kjørt med. Roboten var programmert slik at den beveget seg fra punkt til punkt ved en gitt hastighet. Induksjonsspolen og dens effekt var programmert opp mot tid.

Tabell 6 - Oversikt over de endelige testene der maks effekt (100%) var 25 kW.

Prøve	Medium bakside	Hastighet	Effekt i prosent	Effekt i kW	Lengde	Tid per effekt
X0	Vann 14 gr.C	-	0%	0 kW	60 mm	-
X1	Vann 14 gr.C	2 mm/s	40%	10,2 kW	120 mm	65 sek
X2	Vann 14 gr.C	2 mm/s	55%	13,8 kW	120 mm	65 sek
X3	Vann 14 gr.C	2 mm/s	70%	17,5 kW	120 mm	65 sek
X4	Vann 11 gr.C	4 mm/s	65%	16,3 kW	120 mm	31 sek
X5	Vann 11 gr.C	4 mm/s	75%	18,6 kW	120 mm	31 sek
X6	Vann 11 gr.C	4 mm/s	85%	21,2 kW	120 mm	31 sek
X7	Vann 12 gr.C	6 mm/s	70%	17,5 kW	120 mm	21 sek
X8	Vann 12 gr.C	6 mm/s	80%	20,0 kW	120 mm	21 sek
X9	Vann 12 gr.C	6 mm/s	90%	22,5 kW	120 mm	21 sek



### 3.3. Klargjøring av prøver

På labben ble prøvene kuttet opp med en Struers Labotom 5 kappemaskin. Prøvene ble kuttet til en tykkelse på 1 cm. Deretter ble tverrsnittet delt i to for å få plass i en Opal 410 støpemaskin slik at det ble en øvre og en nedre del for hver prøve. Maskinen støpte prøvene med plastikkpulver ved hjelp av trykk og varme slik at de ble enklere å håndtere videre.

Sliping ble gjort med Saphir 360 slipemaskiner i seks steg. Sandpapirene hadde grovhet 220 grit, 500 grit, 800 grit, 1200 grit, 2000 grit og 4000 grit. Ettersom det ble 10 prøver totalt måtte sandpapirene byttes ut underveis etterhvert som de ble slitt. Da alle prøvene var slipt til de hadde en jevn overflate, ble de polert med Saphir 305 poleringsmaskiner over 3 steg for å få en slettest og blankest mulig overflate. Poleringsdukene som ble brukt var av grovhet 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  og 1  $\mu\text{m}$  med tre ulike poleringsmidler. Disse midlene bestod hovedsakelig av olje og diamantpartikler.

Mellom hver gang prøven ble slipt, ble de skylt i vann, og mellom polering ble prøvene skylt i både vann og sprit for å fjerne oljen. Etter polering ble de også ristet med ultralyd i en Branson Ultrasonic Cleaner for å få bort diamantpartiklene etter poleringen. Til slutt ble prøvene etsset for å synliggjøre mikrostruktur og faseoverganger slik at de lettere kunne studeres. Etsingen ble gjort med 2% nital løsning. Et eksempel på hvordan prøvene så ut etter det siste klargjøringstrinnet, vises i Figur 17. Figuren viser sveisen og de varmpåvirkede sonene for prøve X5.



Figur 17 - Prøve X5 topp og X5 bunn klar for testing

### **3.4. Hardhetsmåling**

Ved Vickers hardhetstest ble hardheten til materialet bestemt med en Nexus 4000 maskin. Maskinen var utstyrt med et mikroskop slik at det var mulig å identifisere de ulike faseovergangene og dermed få en mer presis plassering av målingene. Testen går ut på å trykke ned punkt i materialet som skal testes med en last. Det ble brukt en kraft som tilsvarer 10 kg. Inntrykket som testmaterialet fikk, ble omgjort til hardhet Vickers(HV). Etter at maskinen har gitt materialet et inntrykk, ble diagonalene i det pyramideformede inntrykket målt. Etter måling av diagonalene kunne maskinen bestemme hardhetsverdien til målingene. Med store inntrykk ble det lave HV-verdier, og med små inntrykk ble det høye HV-verdier. Det ble gjennomført flere tester langs smeltegrensen, som representerer det mest kritiske området for høye hardhetsverdier.

### **3.5. Mikroskopi**

For å studere mikrostruktur, ble det brukt et Nikon Eclipse MA200 lysmikroskop. Bakgrunnen for dette var at mikrostrukturen viser hvordan materialet har reorganisert seg etter å ha blitt utsatt for varme. Hvilken mikrostruktur materialene har, forteller noe om resultatet og hvorfor det ble slik. Ved hjelp av mikroskopbildene kan de ulike punktene i materialene sammenlignes med hverandre. På denne måten vil det kunne observeres forskjeller i mikrostruktur. Det ble tatt bilder med mikroskop etter hardhetstestene for å kunne dokumentere med bilder hvor det har blitt målt hardhet.

## 4. Resultater

### 4.1. Hardhetsmålinger

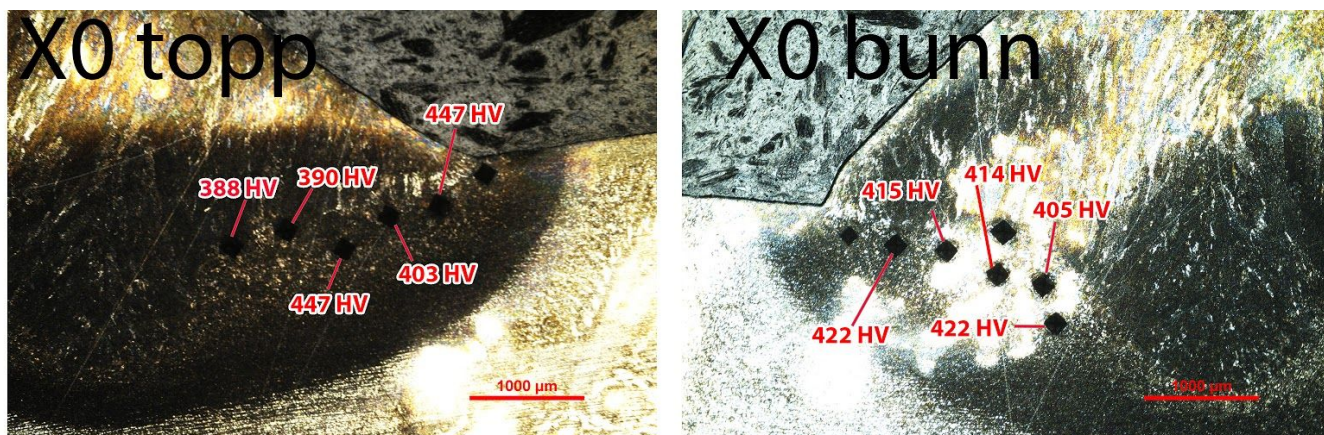
Resultatene etter gjennomførelse av hardhetsmålinger er oppsummert i Tabell 7. Nøyaktig hvor på prøvene målingene er tatt, kan sees på Figurene 18-27. De svarte merkene på Figurene 18-27 er inntrykkene som ble gjort for måling av hardhet. Resultatene viser at den ubehandlede prøven X0 har, som forventet, for høye hardhetsverdier både oppe og nede. Utenom X0, er det kun X9 topp som har et gjennomsnitt på over 350 HV. Gjennomsnittsverdiene under 320 HV er markert med grønt. Gjennomsnittsverdiene mellom 320-350 HV er markert i gult. Gjennomsnittsverdiene over 350 HV er markert i rødt.

I figurene er det noen inntrykk uten verdier i tillegg til verdier som er satt i parentes. Målingene på figurene uten verdier er forkastet grunnet feilmåling over to faser, mens verdiene i parentes er målinger som ikke er med i gjennomsnittsmålingen. Målingene i parentes ble gjennomført for å undersøke om de høyeste hardhetsverdiene faktisk var nærmest smeltegrensen.

Tabell 7 - Oversikt over hardhetsmålinger.

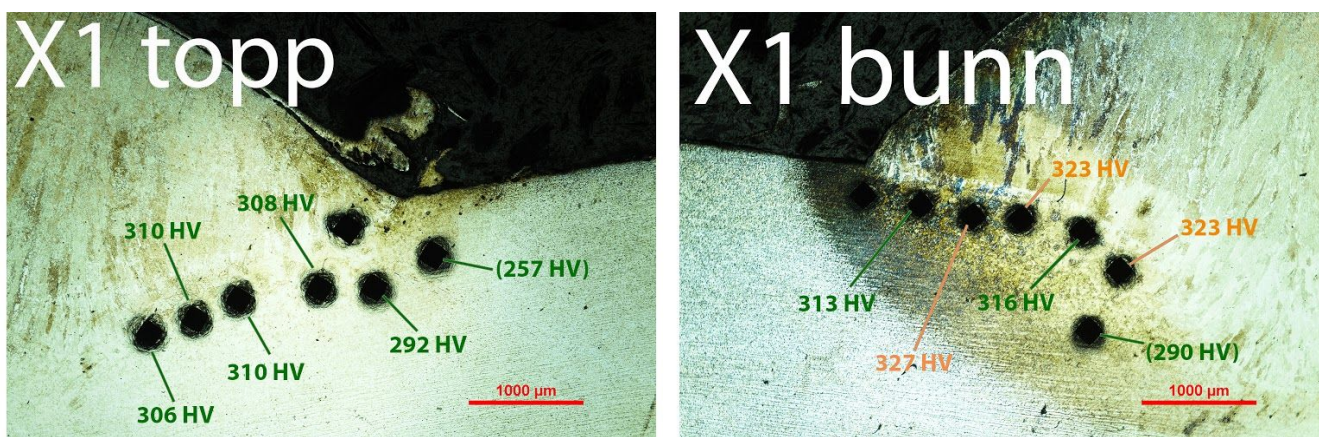
Prøve	X0		X1		X2		X3		X4		X5		X6		X7		X8		X9	
	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn	Topp	Bunn
Måling 1 (HV)	447	422	292	313	305	260	235	264	312	291	301	268	302	277	290	313	279	312	306	293
Måling 2 (HV)	403	415	308	327	290	247	264	274	305	281	283	286	264	290	309	308	275	305	416	271
Måling 3 (HV)	447	414	310	323	280	262	267	279	273	287	293	298	288	284	288	313	271	278	420	290
Måling 4 (HV)	390	405	310	316	275	259	284	281	295	285	297	283	279	282	249	295	255	280	289	266
Måling 5 (HV)	388	422	306	323	244	257	262	277	220	290	291	267	250	248	249	272	294	270	383	262
Gjennomsnittlig hardhetsverdi (HV)	415	416	305	320	279	257	262	275	281	287	293	280	277	276	277	300	275	289	363	276





Figur 18 - Hardhetsmålinger på prøve X0.

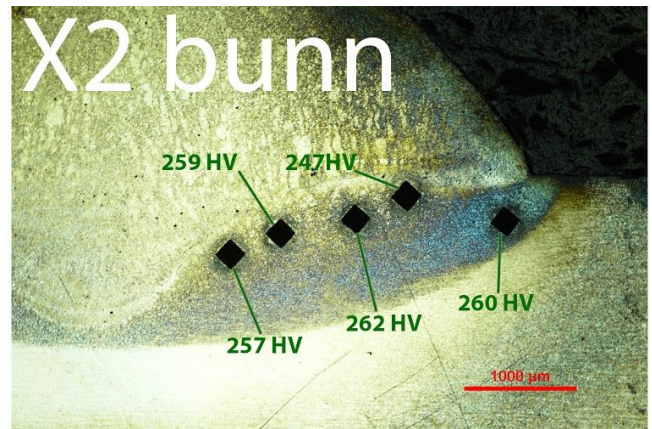
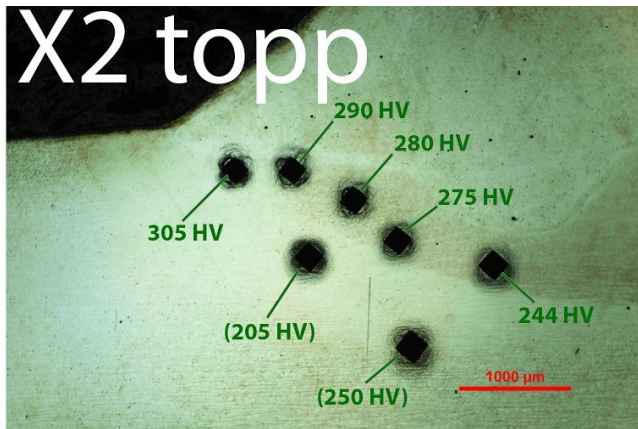
Figur 18 viser resultatene for X0 som ikke ble varmebehandlet. Hardhetsverdiene ligger godt over 350 HV. Gjennomsnittsverdiene var på 415 HV (topp) og 416 HV (bunn) med standardavvik på 30 HV (topp) og 7 HV (bunn).



Figur 19 - Hardhetsmålinger på prøve X1.

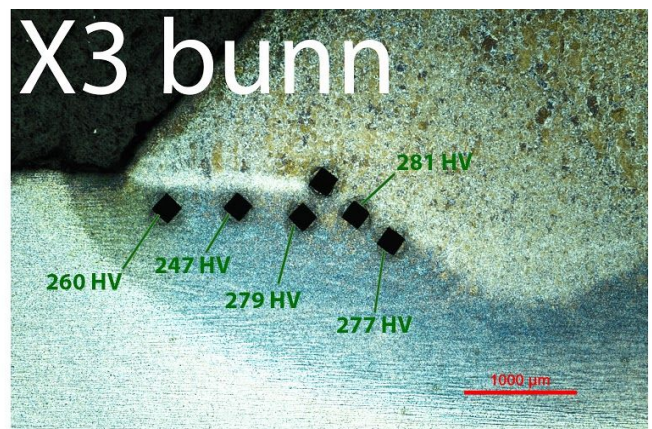
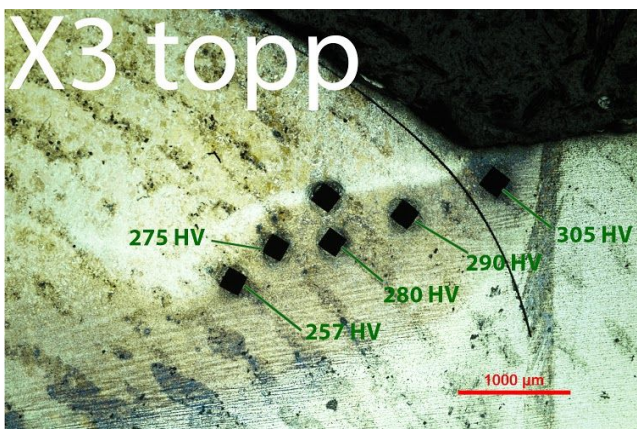
Figur 19 viser hardhetsmålingene på X1. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 2 mm/s og en effekt på 10,2 kW som representerer 40% av maks effekt fra spolen. Gjennomsnittsverdiene var 305 HV (topp) og 320 HV (bunn) med standardavvik på 8 HV (topp) og 6 HV (bunn).





Figur 20 - Hardhetsmålinger på prøve X2.

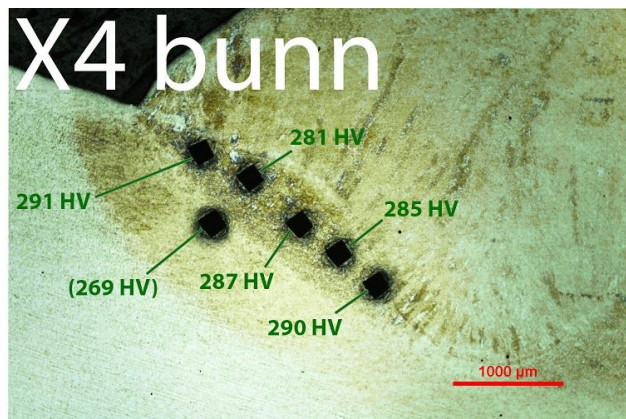
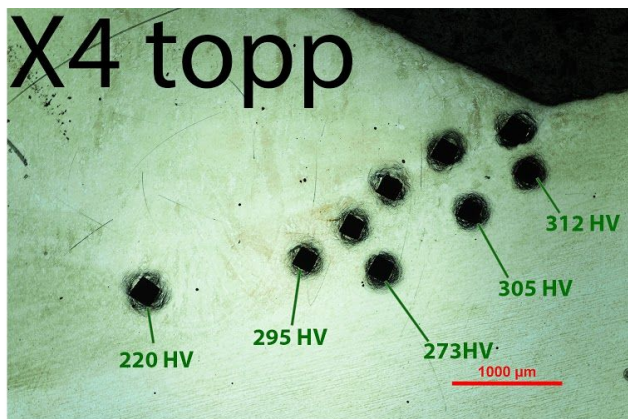
Figur 20 viser hardhetsmålingene på X2. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 2 mm/s og en effekt på 13,8 kW (55%). Gjennomsnittsverdiene var 279 HV (topp) og 257 HV (bunn) med standardavvik på 23 HV (topp) og 6 HV (bunn).



Figur 21 - Hardhetsmålinger på prøve X3.

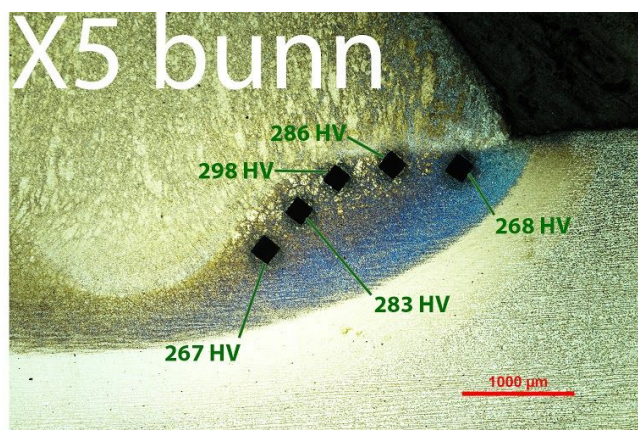
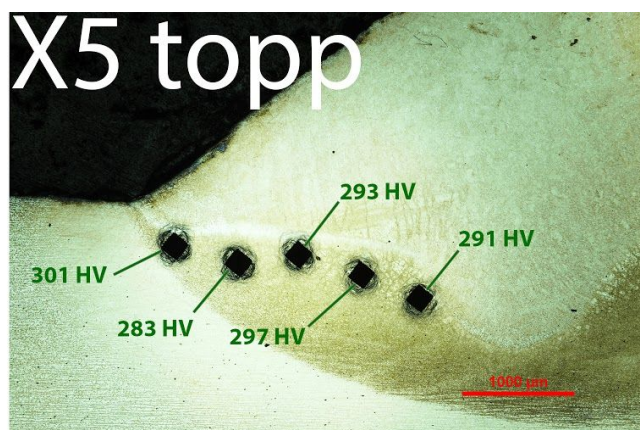
Figur 21 viser hardhetsmålingene på X3. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 2 mm/s og en effekt på 17,5 kW (70%). Gjennomsnittsverdiene var 262 HV (topp) og 275 HV (bunn) med standardavvik på 18 HV (topp) og 7 HV (bunn).





Figur 22 - Hardhetsmålinger på prøve X4.

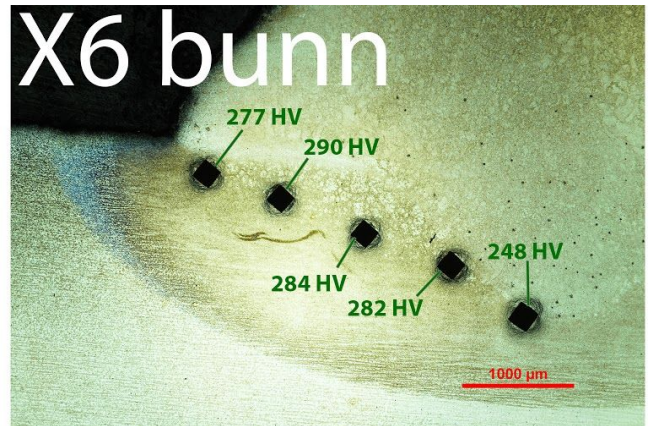
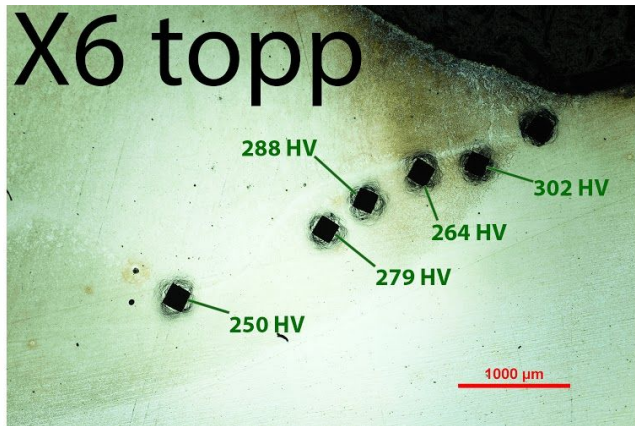
Figur 22 viser hardhetsmålingene på X4. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 4 mm/s og en effekt på 16,3 kW (65%). Gjennomsnittsverdiene var 281 HV (topp) og 287 HV (bunn) med standardavvik på 37 HV (topp) og 4 HV (bunn).



Figur 23 - Hardhetsmålinger på prøve X5.

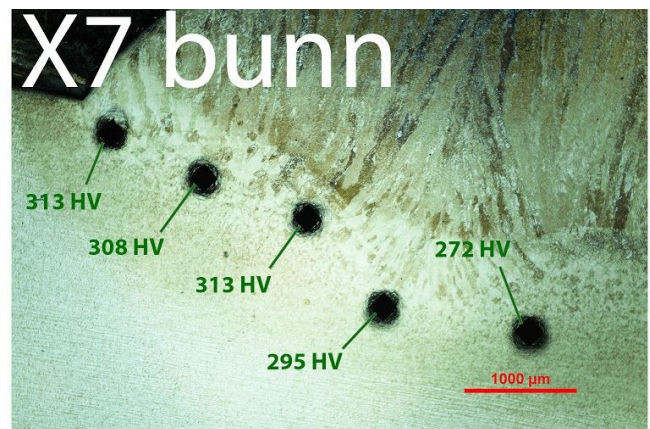
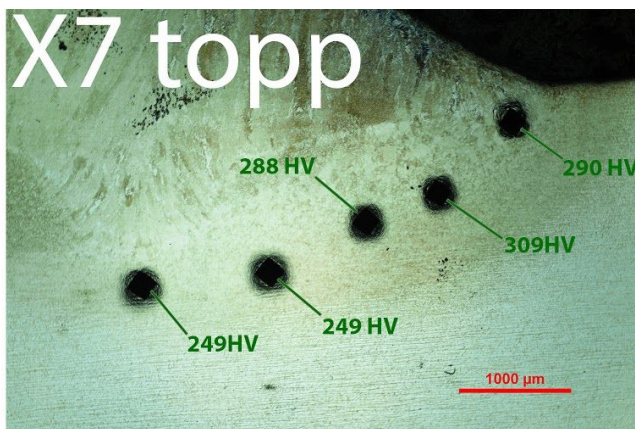
Figur 23 viser hardhetsmålingene på X5. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 4 mm/s og en effekt på 18,6 kW (75%). Gjennomsnittsverdiene var 293 HV (topp) og 280 HV (bunn) med standardavvik på 7 HV (topp) og 13 HV (bunn).





Figur 24 - Hardhetsmålinger på prøve X6.

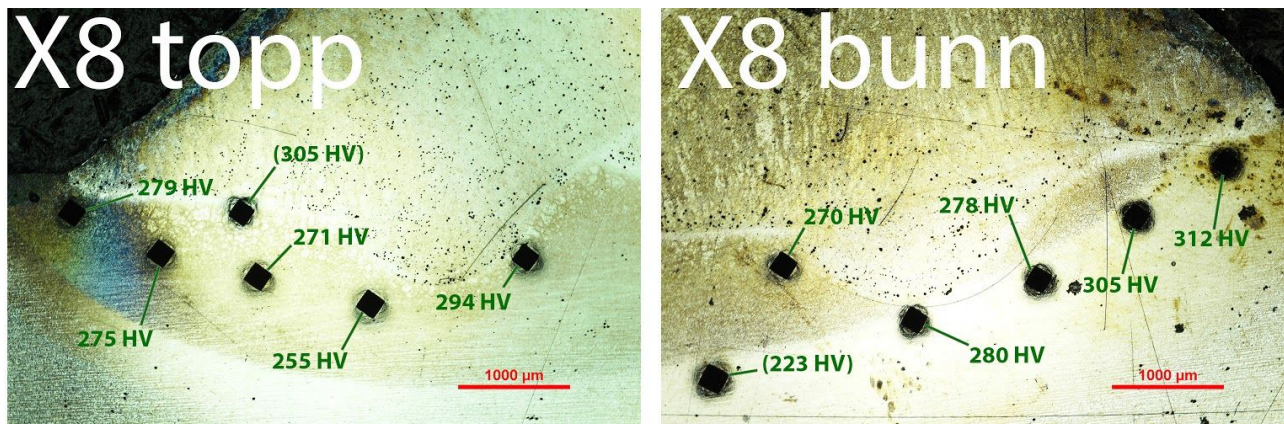
Figur 24 viser hardhetsmålingene på X6. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 4 mm/s og en effekt på 21,2 kW (85%). Gjennomsnittsverdiene var 277 HV (topp) og 276 HV (bunn) med standardavvik på 20 HV (topp) og 16 HV (bunn). Det ble observert etter X6 topp at noen av målingene var for nære hverandre. Fra og med X6 bunn, ble det målt med større mellomrom mellom målingene.



Figur 25 - Hardhetsmålinger på prøve X7

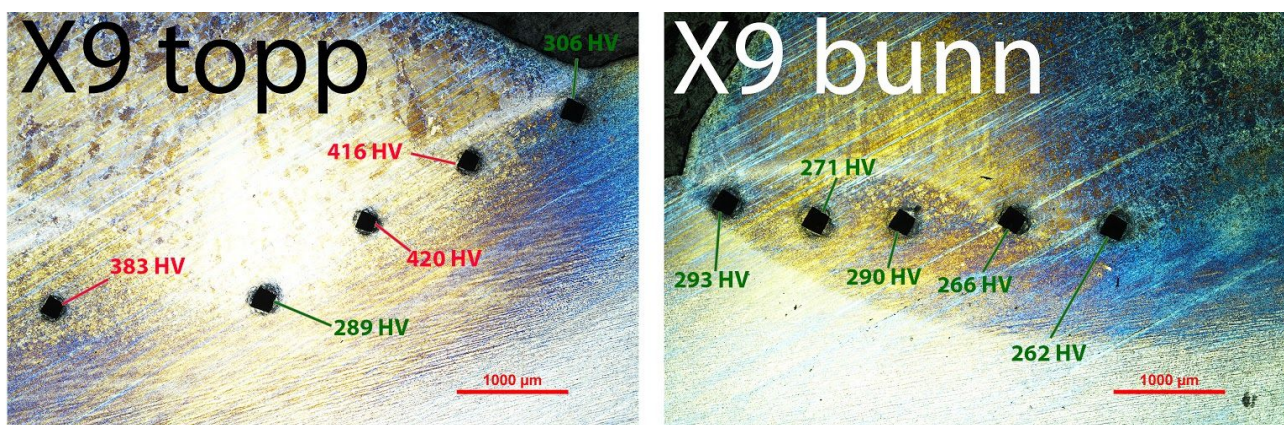
Figur 25 viser hardhetsmålingene på X7. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 6 mm/s og en effekt på 17,5 kW (70%). Gjennomsnittsverdiene var 277 HV (topp) og 300 HV (bunn) med standardavvik på 27 HV (topp) og 17 HV (bunn).





Figur 26 - Hardhetsmålinger på prøve X8.

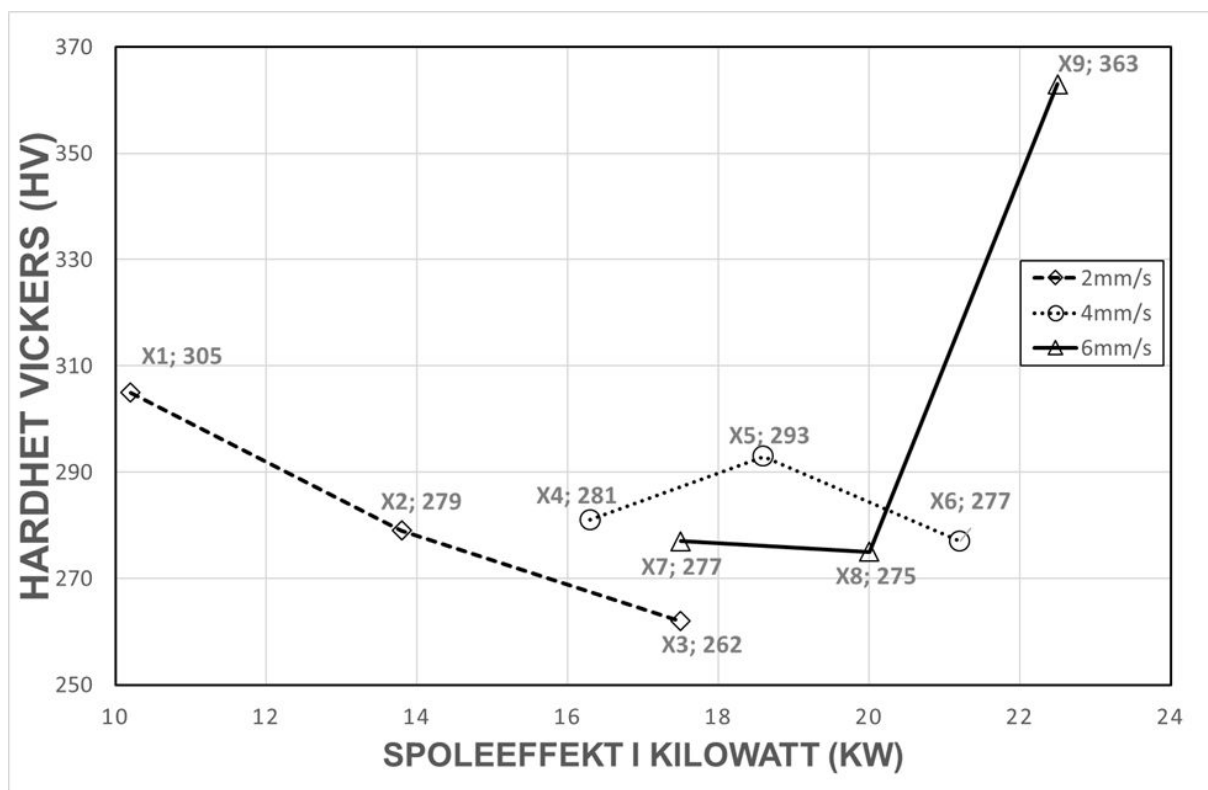
Figur 26 viser hardhetsmålingene på X8. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 6 mm/s og en effekt på 20,0 kW (80%). Gjennomsnittsverdiene var 275 HV (topp) og 289 HV (bunn) med standardavvik på 14 HV (topp) og 18 HV (bunn).



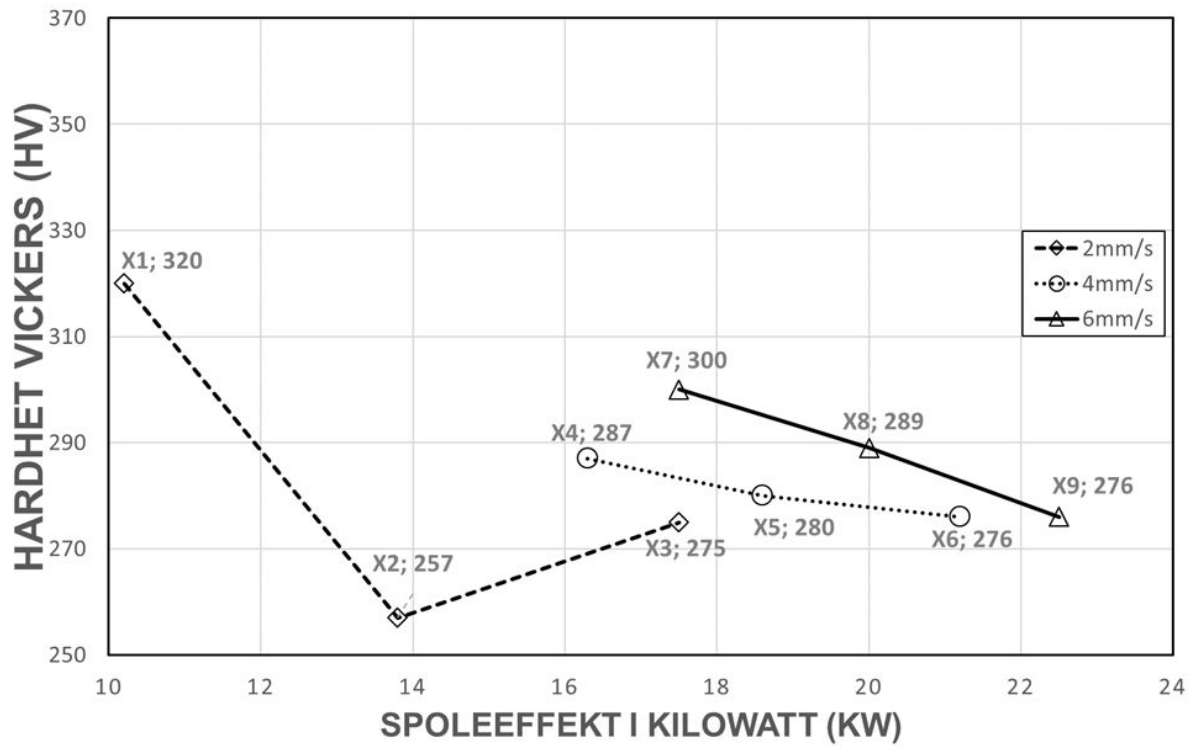
Figur 27 - Hardhetsmålinger på prøve X9

Figur 27 viser hardhetsmålingene på X9. Denne prøven ble varmebehandlet med en hastighet på 6 mm/s og en effekt på 22,5 kW (90%). Gjennomsnittsverdiene var 363 HV (topp) og 276 HV (bunn) med standardavvik på 62 HV (topp) og 14 HV (bunn). Denne prøven ble varmebehandlet med den største effekten sammenlignet med de andre prøvene.

Sammenhengen mellom hastighet, spoleeffekt og gjennomsnittlig hardhet for topp og bunn på prøvene er oppsummert i grafer i Figur 28 og 29. Grafene viser en tydelig forskjell på hva økt effekt førte til ved de ulike hastighetene i toppen og i bunnen av sveisen. Trenden på grafene er at hardhetsverdien avtar med økt effekt på induksjonsspolen, avhengig av hastigheten spolen ble kjørt på. Grafen i Figur 28 viser at på prøve X9 topp øker verdien betraktelig til over akseptabel maks-verdi. Under testing ble det observert at effekten var så høy at sveisetilsettet smeltet i dette området. Den stiplede linja i graden som representerer hastigheten 4 mm/s viser hardhetsverdiene for prøvene X4, X5 og X6. Disse prøvene ser ut til å ha jevne og akseptable hardhetsverdier både for toppen og bunnen av prøvene. I begge grafene avtar hardheten mye når man ser på X1 og X2. Effekten fra spolen ved X1 ser ut til å ha vært for lav. Hardhetsverdiene for X2 er betydelig lavere enn ved X1.



Figur 28 - Sammenheng mellom hastighet, spoleeffekt og hardhet for toppen av prøvene.

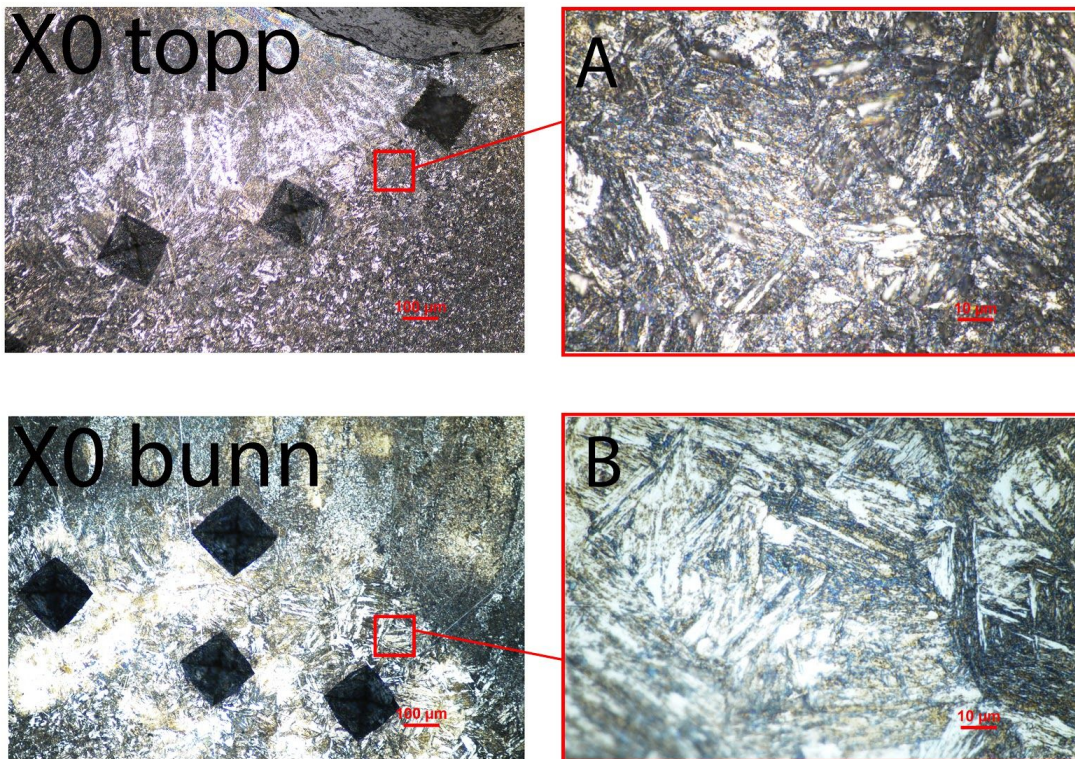


Figur 29 - Sammenheng mellom hastighet, spoleeffekt og hardhet for bunnen av prøvene.



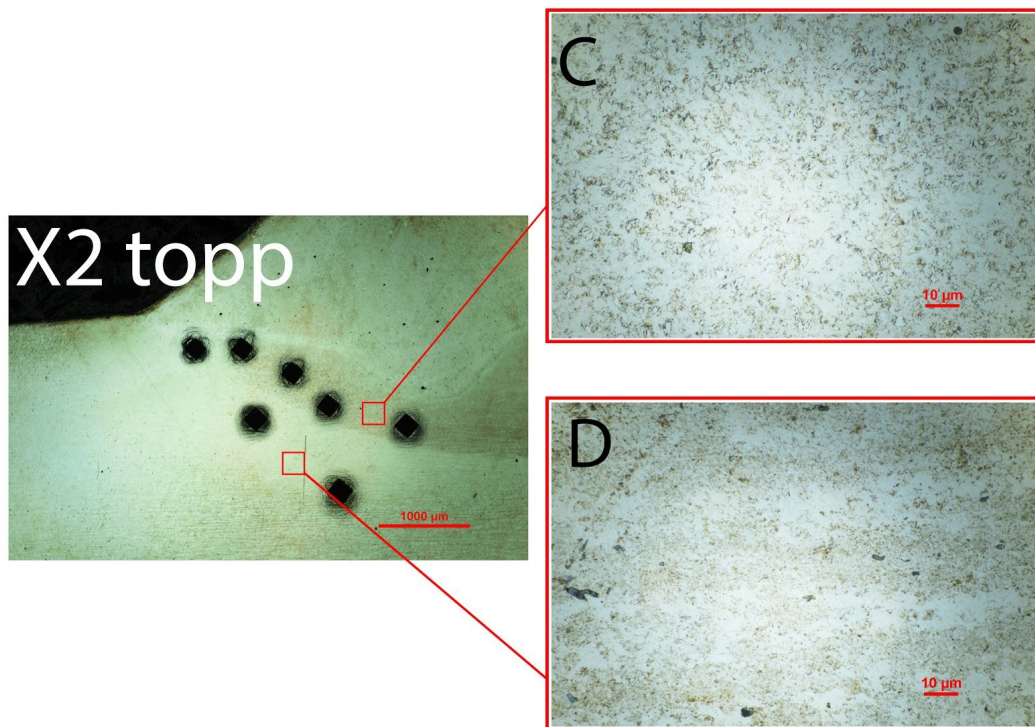
## 4.2. Mikrostruktur

Hardhetsmålingene indikerte områder av interesse for videre undersøkelser i lysmikroskop. Figur 30-34 viser mikrostrukturer i prøvene X0, X2 topp, X8 topp og X9 topp. Figur 30 tilhører referanseprøven X0, og viser at det har blitt dannet noe som ligner martensitt under sveiseprosessen. De resterende mikrostrukturene var ikke mulige å fastslå med sikkerhet. Det er derfor gjort antagelser. Disse er antatt ved hjelp av sammenligninger med Figur 5 og 6 koblet opp mot hardhetsverdier og hvilke verdier som forventes med de gitte strukturene.



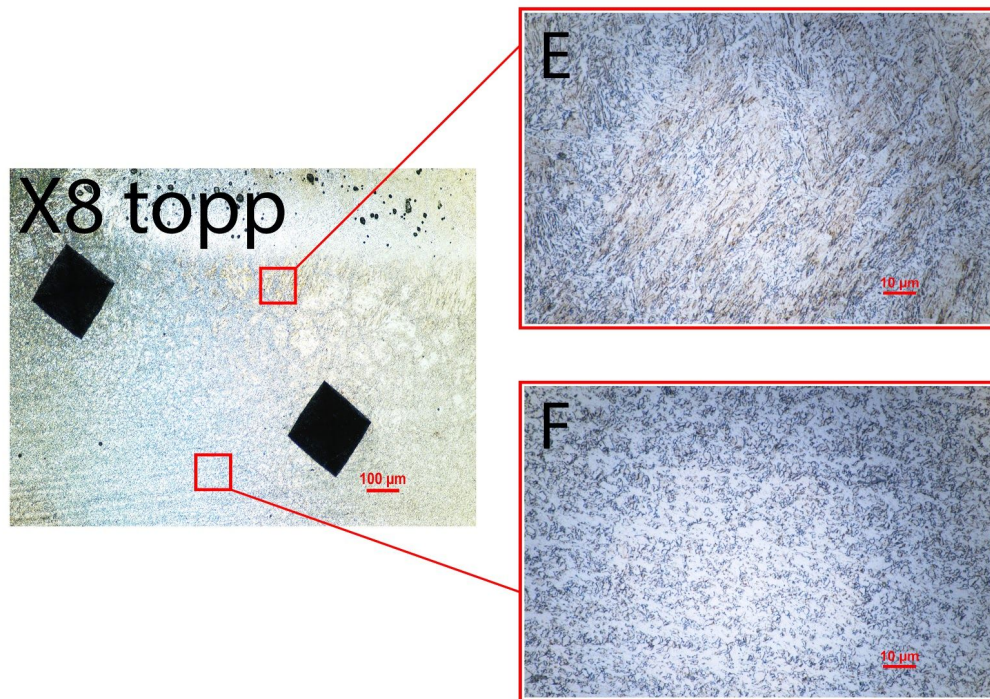
Figur 30 - Mikrostruktur i de hardhetsmålte områdene på prøve X0 (100x).





*Figur 31 - Mikrostruktur i de hardhetsmålte områdene på prøve X2 topp (100x).*

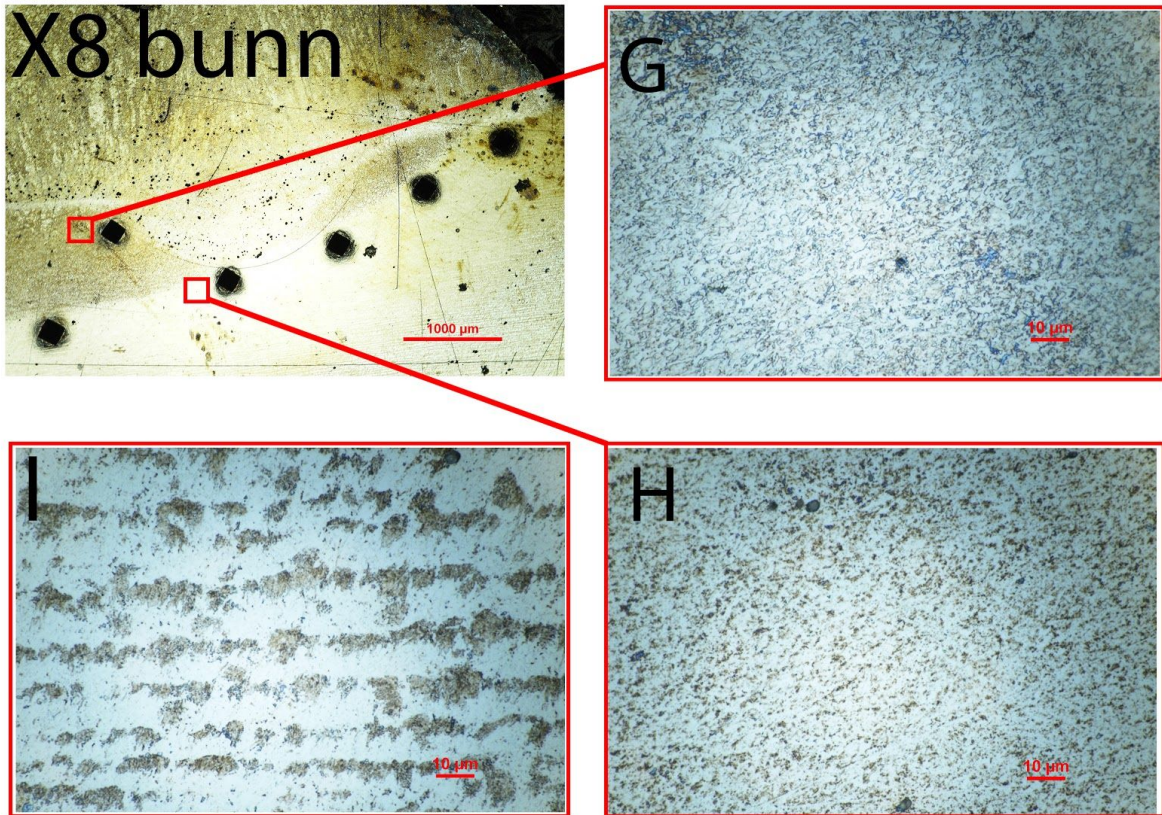
Prøve X2 topp har forholdsvis lave hardhetsverdier og Figur 31 viser ved C og D fine strukturer som svarer til lav hardhet. Figuren viser at C og D er to forskjellige varmepåvirkede soner med hver sin mikrostruktur. Mikrostrukturen i C er et resultat av spolens varmetilførsel på sveisen. Mikrostrukturen i D er et resultat av sveisepistolens varmetilførsel. C viser en struktur med preg av ferritt, og D viser en finere struktur med lavere hardhet.



Figur 32 - Mikrostruktur i de hardhetsmålte områdene på prøve X8 topp (100x).

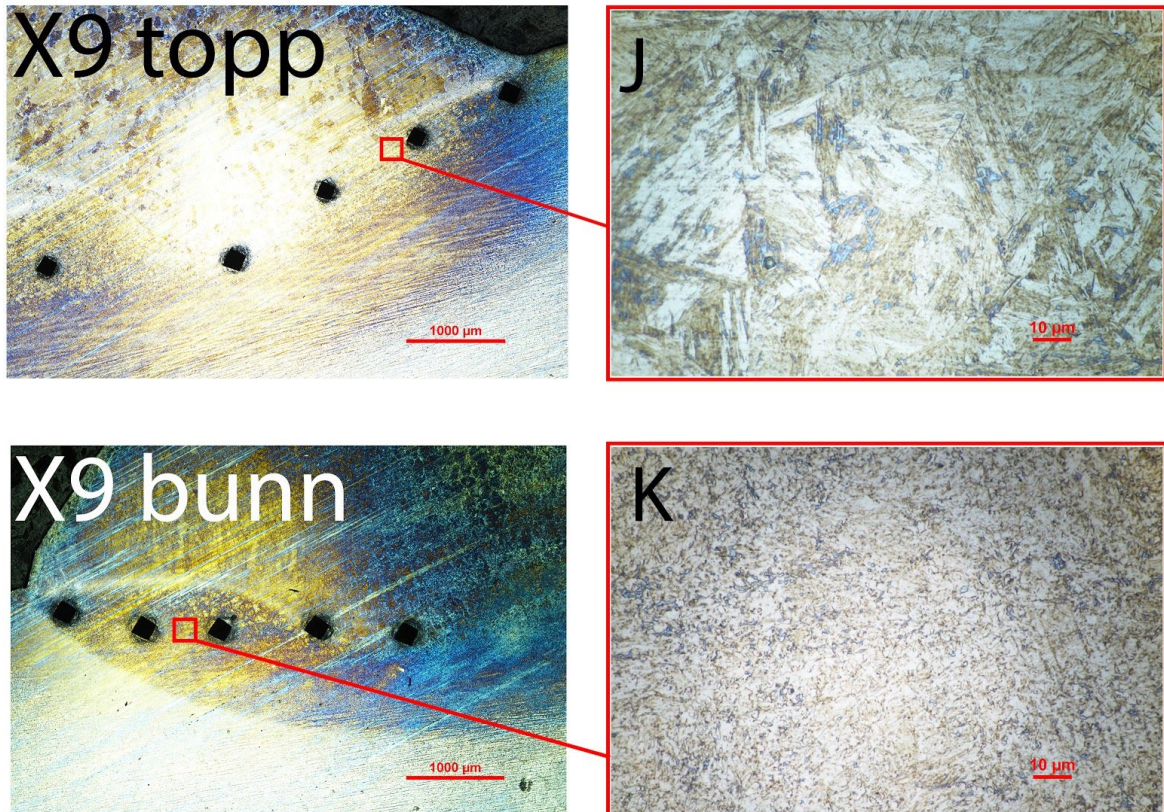
Figur 32 viser forskjellen i mikrostruktur i to ulike faser under smeltegrensen. Mikrostruktur E representerer et hardere område enn mikrostruktur F. Dette forstås ut ifra mikrostrukturen i E, som antas å være bainittisk. Strukturen i F antas å være ferrittisk.





Figur 33 - Mikrostruktur i de hardhetsmålte områdene på prøve X8 (100x).

Figur 33 viser mikrostrukturen til bunnen av prøve X8. Område I er mikrostrukturen i grunnmetallet målt utenfor den varmepåvirkede sonen. Område I ser ut til å være en blanding av ferritt og perlitt. Områdene G og H er avbildet i den varmepåvirkede sonen. Mikrostrukturen i G er påvirket av både sveisepistolens og induksjonsspolens varmetilførsel, mens H er påvirket av sveisepistolens varmetilførsel. Både G og H antas å være av bainitt, der G er en litt grovere variant enn H.



Figur 34 - Mikrostruktur i de hardhetsmålte områdene på prøve X9 (100x).

Områdene J og K på Figur 34 viser mikrostrukturen i like områder på prøve X9 topp og bunn. Det er tydelig forskjell i mikrostruktur på de to prøvene. Område J representerer et område med en hardhet ~ 400 HV. Det bærer preg av martensittdannelse i mikrostrukturen. Område K representerer et område med ~ 300 HV. Mikrostrukturen her antas å være ferrittisk.



## 5. Diskusjon

### 5.1. Sveisemetode og sveiseparametre

For reparasjon av rør og tanker i drift vil det være nødvendig med reparasjoner på flater som er både vertikale og horisontale. GMAW har den fordel at tilsettet blir matet ut av sveisepistolen, noe som gjør at den lettere kan opereres med bare én maskin ettersom man ikke trenger en annen maskin til å påføre tilsettet. Tilsettet som ble benyttet var en kompakttråd. Dette gir en renere sveis samtidig som fysisk tilstedeværelse ved fjerning av slagg unngås. Reparasjonene som må utføres vil skje på rør som vil inneholde jern og som må sveises vertikalt og opp-ned. Dette gjør at det ble valgt å bruke MAG sveising siden MIG sveising egner seg dårlig ved sveising av karbonstål. MAG sveising er blitt benyttet tidligere med roboten, og Equinors erfaringer var at denne metoden var stabil og uproblematisk å gjennomføre under kontrollerte forhold.

En del av problemstillingen gikk ut på å optimalisere temper bead sveising, men teknikken ble etter hvert utelukket fra denne testen. Med bruk av temper bead er det tenkelig at referanseprøven X0 ville vært nærmere 350 HV enn ved å bare legge strengene oppå hverandre som i vanlig MAG sveising. Grunnen til dette er at det vil forekomme noe temperering når det sveises strenger oppå hverandre, men dette vil ikke ha like god effekt som ved temper bead. Med temper bead er varmetilførselsforholdet mellom strengene beregnet og tempereringen større. Det ble valgt å bruke induksjon som en alternativ etterbehandlingsmetode for å temperere sveisen istedenfor å bruke temper bead. Det var mulig å bruke MAG sveising sammen med temper bead teknikken, og deretter temperering med induksjon i tillegg. Dette ble utelukket fordi dette hadde gjort testen i sin helhet mer komplisert å gjennomføre. Sveiseprosessen ble gjort enklest mulig for å fokusere på etterbehandlingen. Hensikten med on-site repair er at alt skal være enklest mulig, slik at det krever minst mulig for å kunne gjennomføre konseptet på en hensiktsmessig måte.

Det ble valgt en varmetilførsel på 0,47 kJ/mm og en sveisehastighet på 6 mm/s. Bilder ble tatt av innbrenningsprofilen, og disse viste at innbrenning ikke vil være noe problem med disse parametrene. Innbrenningsprofilen til prøve X5 er vedlagt som Vedlegg 1. Platen det ble sveiset på var 6 mm tykk. Vedlegget viser at innbrenningen var på kun 1,2 mm. Med den høye sveisehastigheten og varmetilførselen ble det introdusert et problem med for høye hardhetsverdier, slik som ønsket. Det ble tilført varme i en kort periode, og dette resulterte i kort nedkjølingstid.

Referanseprøven X0 viste hvor langt over maksverdien 350 HV sveisene egentlig var uten temperering. Målingene for prøve X0 viste at hardhet var et stort problem og at det måtte etterbehandles for å få hardhetsverdiene ned til et akseptabelt nivå.

Det høye argoninnholdet i firekomponent-gassen Teral 22 førte til god kontroll på innbrenning og en mindre oksiderende effekt ved at det ikke er så mye CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> i blandingen. Innbrenningen ligner argonprofilen som vist på Figur 3. Denne innbrenningsprofilen er ofte et resultat av liten prosentandel CO<sub>2</sub> i gassblandingen. Høyere prosentandel CO<sub>2</sub> i gassblandingen ville gitt dypere og bredere innbrenning i grunnmaterialet, noe som kunne skapt et problem med gjennombrenning. Høyt innhold av oksiderende gasser i blandingen vil kunne gi avbrenning av legeringselementer i stålet som kan gi negative resultater for de mekaniske egenskapene til sveisen. Slaggpartikler i sveisen som følge av oksidasjon kan gi porer og skape problemer dersom det legges sveiestrenger i flere lag. Under sveisingen av prøvene ble det observert en meget stabil lysbue, uten tegn til overfladiske porer eller slagg. Ulempen med å bruke en firekomponent-gass ovenfor en standard Ar/CO<sub>2</sub>-gass er at den er mye dyrere. Fordelen er at den vil gi en mye bedre kvalitet på sveisen både kvalitetsmessig og utseendemessig.

## **5.2. Induksjon som etterbehandlingsmetode**

Til tross for at induksjonsspolen ikke var designet for dette formålet, ble den likevel brukt for å teste metoden, samt å samle kunnskap om induksjon som etterbehandlingsmetode. Ettersom dette aldri har blitt gjort på denne måten, var det av stor interesse å finne ut om dette fungerte. Før de tellende testene, ble det gjennomført innkjøring av spole for å finne de riktige kombinasjonene av effekt og hastighet. Det var mulig å observere hvor stor del av sveisen som ble varmet på grunn av gløding. Det oppstod gløding på sveisen, men ikke på platen det ble sveiset på, fordi spolen var konsentrert mot sentrum av sveisen. Høy effekt førte til smelting av sveisen uten at spolen fikk noe vesentlig større område til å gløde. Da spolen var riktig konfigurert, ble prosessene enkle å både repetere og kontrollere ved programmering. Det er nødvendig å gjennomføre flere tester for å kartlegge hvilke parametre som passer best for materialet som ble testet på. Materialene vil respondere ulikt på induksjon ut fra sammensetning. Etter en slik kartlegging, vil programmeringsdelen være relativt enkel.

Sammen med roboten utgjør induksjon som etterbehandlingsmetode en god metode å temperere sveis på. Spolen var liten, enkel å ha med å gjøre og kunne totalt gi 25 kW effekt. Dette viste seg å være mer enn nok for å temperere sveisen i denne testen. Induksjon gir mulighet for spenningsreduksjon og behandling av sveis der klassisk PWHT med direkte kontakt ikke lar seg gjøre.

Denne delen av konseptet vil heller ikke kreve annet enn montering av spole på robotarm, i tillegg til programmering for å anvende induksjon som etterbehandlingsmetode. Til tross for at en del avansert teknologi er involvert, oppleves ikke metoden som alt for krevende.

Resultatene tilsier at det er mulig for Equinor å gå videre med utvikling av denne metoden å etterbehandle sveis på. Induksjon som etterbehandling kan se ut til å kunne erstatte temper bead teknikken og vanlig PWHT bestående av oppvarming og spenningsreduksjon ved kontakt. Om dette viser seg å være tilfelle vil det ikke lengre være nødvendig å gå videre med optimalisering av temper bead teknikken. Equinor kan fortsette med vanlig MAG sveising, og fokusere på videre utvikling av induksjon som etterbehandlingsmetode.

### **5.3. HAZ og nedkjølingstid**

Etter at poleringen og etsingen var gjennomført kunne de ulike sonene på prøvene tydelig observeres. Selv uten mikroskop var det på de fleste prøvene mulig å se hvor grensen mellom smeltesone, HAZ og grunnmetall var. På enkelte prøver der varmetilførselen under induksjonsprosessen hadde vært veldig høy var det oppstått flere soner. På toppen av prøve X2 i Figur 20 kan man se at det har oppstått en HAZ både fra sveising og fra induksjon. Det ble tatt noen ekstra hardhetsmålinger på denne prøven for å sjekke om det hadde oppstått nye soner med høye hardhetsverdier. Målingene ble gjort på bakgrunn av at oppgaven går ut på å temperere HAZ, og det nå hadde oppstått to ulike soner. Målingene viste at hardhetsverdiene i den nye sonen ikke var noe problem. Disse hardhetsmålingene havnet i sonen som oppstod etter induksjon og er derfor ikke tatt med i resultatene. På prøvene X1, X3, X4 og X6 er noen av hardhetsmålingene tatt på smeltegrensen. Et inntrykk som skjer over to forskjellige faser kan gi et galt resultat siden hardheten i de to fasene vil være forskjellig. Dette kan føre til skjeve inntrykk og avvik i verdiene.

Ettersom det ikke ble gjennomført målinger for nedkjølingstid og temperatur, vil det ikke være mulig å fastslå med sikkerhet hva nedkjølingstiden var. En mulig måte å kunne anslå nedkjølingstiden kan være å studere mikrostrukturer og fasediagram. Da det ikke har blitt dannet store mengder martensitt, og at hardhetsverdiene på de fleste av prøvene er akseptable, kan det antas at nedkjølingstiden har vært tilstrekkelig. Sammenlignet med referanseprøven X0 er det store forskjeller i mikrostruktur. Fullstendig kontroll over nedkjølingstid var verken et mål eller mulig for denne testen, men det er mulig å få kontroll over dette ved hjelp av for eksempel sensorer som måler varme. Det viktigste var å kartlegge potensialet for hardhetsreduksjon med induksjon som etterbehandling.

Ut fra resultatene og verdiene som ble brukt under testingen kan man se noen trender som ble fremtredende. Det ble testet med forskjellige hastigheter og effekter på induksjonsspolen for å regulere nedkjølingstiden slik at det ikke ble dannet martensitt. Ut fra verdiene vist i Tabell 10 kan det tyde på at lav hastighet med høy effekt gir lengre nedkjølingstid og dermed lavere hardhetsverdier. Dette ser ut til å gjelde helt til varmetilførselen overstiger den kritiske transformasjonstemperaturen til sveisen. På prøve X9 er det et hopp i hardhetsverdier for toppen av prøven. Det kom som et resultat av at den kritiske transformasjonstemperaturen er blitt overskredet og sveisen smeltet under varmebehandlingen.

## 5.4. Hardhetsreduksjon

På forhånd var det forhåpninger om at noen få av prøvene skulle få akseptable hardhetsverdier. Prøven det var størst tiltro til var prøve X3, grunnet kombinasjonen av lav hastighet og høy effekt. Resultatene indikerer at induksjon som etterbehandlingsmetode har bidratt til hardhetsreduksjon i et flertall av prøvene. Materialet har fått reorganisert seg mer slik som man i dette tilfellet ønsker det. Induksjonsspolen har ved de ulike effektene gitt en økning i nedkjølingstid, sammenlignet med referansen X0. Det har vært tilstrekkelig med tid til diffusjon og det ser derfor ut til å ha blitt dannet ønskelige mikrostrukturer.

Ut fra resultatene kan en se at det i liten grad har blitt dannet martensitt, med unntak av i prøve X0 og X9 topp. Ved prøve X9 ble det tilført 22,5 kW (90%) sammen med en hastighet på 6 mm/s. Den øvre delen av sveisen har fått mer varme enn den nedre delen, og derfor er det kun på den øvre delen det oppstod problemer. Konsekvensen av dette var at deler av den øvre delen av sveisen smeltet. Hvor mye mer varme som ble tilført på den øvre delen var ikke mulig å fastslå. X9 bunn hadde derimot akseptable hardhetsverdier på godt under 300 HV. Ved å sammenligne X0 og X9 topp, ble det observert likheter i mikrostruktur. Begge disse prøvene har hatt martensittdannelse. Ved sveising ble det sveiset med en hastighet på 6 mm/s. Induksjonsspolen beveget seg også med 6 mm/s ved X9. Ved referanseprøven X0 ble hardheten høy fordi varmetilførselen var lav, og i tillegg var hastigheten høy. Ved X9 topp ble den kritiske transformasjonstemperaturen overskredet. Sveisen smeltet og størknet på nytt slik at nedkjølingen ble mer som i referanseprøven. Prøven ble allikevel noe temperert av induksjonsspolen og det ble derfor lavere hardhetsverdier enn ved X0.

Prøve X1 var den eneste prøven med gjennomsnittsverdi på mellom 300-350 HV for både topp og bunn. Ved X1 var hastigheten lik 2 mm/s og effekten var 10,2 kW (40%). Dette var den laveste tilførte effekten sammenlignet med de andre prøvene. Lavere effekt gir mindre varmetilførsel.



Mindre varmetilførsel fører til at temperaturen totalt sett blir lavere, nedkjølingshastigheten går opp og nedkjølingstiden går ned. Denne tankegangen er vist i Figur 10 i kapitlet om varmetilførsel. Det er verdt å nevne at dette resultatet er et godkjent resultat ettersom verdiene ikke overskrider 350 HV. Dette blir satt litt i skyggen fordi det er andre prøver med enda lavere hardhetsverdier.

Som forventet var noen av de laveste hardhetsverdiene funnet i X3. Prøvene X2 og X3 var tilnærmet helt like selv om det var henholdsvis 13,8 kW og 17,5 kW effekt tilført fra spolen. Hardhetsverdiene var like, i tillegg til at det kun var små forskjeller i mikrostruktur. Figur 20 og 21 viser prøvene X2 og X3, og ved å se på de ulike fasene og faseovergangene kan en se likheter i både smeltegrensene og i HAZ. Det kan se ut som om den lave hastigheten på 2 mm/s bidrar til en høyere nedkjølingstid. Dette gir mening om man ser for seg at spolen totalt bruker lengre tid på å tilføre varme i sveisen. Ut ifra resultatene for denne hastigheten kan en anta at det ved lavere effekter enn ved X1 (10,2 kW), vil oppstå en økning i hardhet.

Prøvene X2-X8 hadde gjennomsnittsverdier mellom 257-300 HV, noe som blir kategorisert som gode resultater. Dette er under 350 HV med god margin. Med disse prøvene følger ulike hastigheter kombinert med ulike effekter. Det er verdt å nevne at alle de tre kombinasjonene som inneholdt hastigheten 4 mm/s hadde hardhetsverdier under 300 HV. Dette indikerer at denne hastigheten, med de ulike effektene 16,3 kW, 18,6 kW og 21,2 kW, kun har fått positive følger med tanke på målet om hardhetsreduksjon.

Resultatene indikerer at det er oppnådd et vidt spenn av hardhetsverdier. Med optimalisering og videre testing skal det kunne være mulig å oppnå de hardhetsverdiene man ønsker. Med hardhetsverdier langt under 300 HV, kan det oppstå andre problemer med for eksempel redusert styrke. Løsningen i fremtiden kan være et kompromiss mellom hardhet og andre materialegenskaper.

## **5.5. Feilkilder og usikkerhet knyttet til målingene**

Etter sveiseprosessen ble det observert at platen hadde blitt buet på grunn av spenninger. Platen var full av sveisefelt, noe som er viktig å presisere. Problemet oppstod på grunn av gjentatte sveiseprosesser på den samme platen og ikke bare på grunn av denne sveiseprosessen. For operatøren var det derfor krevende å programmere inn en konstant avstand mellom spole og sveis. Det ble antatt at det var flere punkter der spolen var nærmere sveisen enn andre, men det var ikke mulig å vite nøyaktig hvor dette skjedde.

Den øvre og den nedre delen av sveisene ble varmet ulikt. Den øvre delen av sveisen ble tilført mer varme enn bunnen. Dette ble observert underveis og senere vist i resultatene. Det var heller ikke helt sikkert at spolen traff midt i sveisen. Konstant avstand mellom spole og sveis var viktig for å få en konstant varmetilførsel, på grunn av at varmeeffektiviteten fra spolen på sveisen avtar med avstanden. Dette førte til at små forskjeller i avstand utgjorde store forskjeller i varmetilførsel. Ettersom det var en bøyning i platen, kan man anta at bøyningen har ført til at spolen var nærmere den øvre delen av sveisen enn den nedre. Spolen var heller ikke designet til dette formålet, slik at ujevn varmetilførsel på sveisen var noe som kunne oppstå. På bakgrunn av resultatene er dette viktig å ta i betraktning. Grafene i Figur 28 og 29 viser poenget ved at de to grafene ikke er identiske. Trendene er i og for seg forholdsvis like med at hardheten avtar med økende effekt, men verdiene er ulike. Ved X1 ble det brukt en lav effekt. På grunn av at spolen varmet mer oppe enn nede, ble X1 topp tilført mer varme enn X1 bunn. Dette viser resultatene med henholdsvis 305 HV og 320 HV i snitt. Samtidig har effekten ved X9 smeltet toppen av sveisen og gitt hardhetsverdier over 350 HV, mens hardhetsverdiene ved X9 bunn er godt under 300 HV. Med den høye effekten, smeltet sveisen istedenfor at et større område ble varmet. Grunnen til dette var antakeligvis relatert til avstanden fra spolen til sveisen. Arealet som spolen varmet opp, dekket kun sveisen og traff ikke platen direkte.

Ved klargjøring av prøvene var det noen faktorer som kan ha påvirket resultatene. Det oppstod noe skjevhet på et par av prøvene (X4 og X9). Disse prøvene ble slipt og polert på nytt for å gjøre de flatest mulig. Det at de ikke var helt flate var ugunstig da dette kan gi skjeve inntrykk i materialet ved hardhetstesting. En konsekvens av denne skjevheten er at hardhetsverdiene kan bli ukorrekte.

Etsing fungerte bra på noen av prøvene og dårlig på andre. Det ble ved noen prøver vanskelig å anslå nøyaktig hvor smeltegrensen var, samt å plassere inntrykkene med høy nok presisjon. Testmaskinen som ble brukt til hardhetsmåling var utstyrt med et mikroskop, som det i noen tilfeller ikke var enkelt å se faseovergangene i. Det var flere inntrykk som ble plassert i faseoverganger, slik at det traff to ulike faser samtidig. Ved slike tilfeller må målingene forkastes på grunn av at inntrykkene treffer fasene ulikt og det oppstår deformasjon.

Det ble fra X0 til X6 oppe plassert inntrykk der noen av målingene var for nære hverandre. Dette ble observert underveis og deretter ble avstanden mellom inntrykkene økt. Årsaken til at de likevel var for nære var at målepunktene ble lokalisert i mikroskopet med ulike forstørrelser avhengig av hvor synlige overgangene var. Dette ble rettet på fra og med X6 nede. Inntrykkene ble derfra plassert med gode mellomrom slik at de ikke påvirket hverandre. På mikroskopbildene kunne man ikke se at de påvirket hverandre, noe som indikerer at påvirkningen skjedde under overflaten.

Hvordan og i hvor stor grad dette påvirker hardhetsverdiene er usikkert. I testmaskinens manual stod det at det burde være signifikant avstand mellom inntrykkene (2-3 diagonals avstand), men det ble ikke presisert hvor hvor utslagsgivende dette er for resultatet. Siden det ikke står at dette påvirker resultatene mye, ble det ikke laget nye prøver. På generell basis var hardhetsverdiene uansett langt under  $HV_{max}$  på 350 HV. Da det heller ikke ble observert martensitt i særlig grad, antas hardhetsverdiene å være tilnærmet lik riktige. Der det ble observert mengder martensittdannelse, var verdiene betydelig høyere.

Feilmarginen til testmaskinen var på 2,5%. Det ble gjennomført hardhetsmåling på en testprøve som tilsvarte 442 HV. Prøven ble målt til 433 HV. Dette er antakeligvis ikke utslagsgivende, men likevel verdt å nevne. Det vil bli gjennomført ytterligere hardhetsmålinger og tatt nye mikroskopbilder på SINTEF, da de er tildelt like prøver. Noen av feilkildene beskrevet i dette kapitlet vil være av interesse for SINTEF ettersom de ikke var tilstede under testing på Tjeldbergodden.

## **5.6. Veien videre for on-site repair**

For sveiseprosessen i on-site repair, kan det være viktig å bruke de samme sveiseparametrene i første omgang. Resultatene som ble opparbeidet i denne oppgaven hadde utgangspunkt i de valgte sveiseparametrene. Andre sveiseparametre vil gi forskjellige hardhetsverdier langs smeltegrensen. Frem til simulering av sveiseprosessen er en mulighet og et sikkert alternativ, kan det være hensiktsmessig å bruke de samme parametrene. Med simulering kan det være mulig å forutse hardhet etter sveising på et gitt materiale. Før den tid vil det med like sveiseparametre være stabile hardhetsverdier som må tempereres, og dermed enklere å fokusere på å utvikle induksjon som etterbehandling.

Ved å designe en spole for dette formålet vil den kunne varme like mye oppe som nede. Dette vil føre til jevne og gode hardhetsverdier langs hele smeltegrensen, så fremt de rette kombinasjonene av effekt og hastighet blir brukt. Det kan være nødvendig å designe spoler i ulike størrelser avhengig av hvor stort areal som skal tempereres. Testen som ble gjennomført hadde to ulike programmeringsprosesser. Roboten og spolen ble programmert hver for seg. Bevegelsen til roboten ble programmert på én maskin, effekten og intervallene til spolen ble programmert på en annen maskin. I fremtiden vil det være gunstig å ha et felles program for prosessene. Programmeringen vil også kunne gjøres enklere med montering av ulike sensorer. Det vil være muligheter for å bruke en sensor slik at spolen får en konstant avstand til sveisen.

Veien videre går mot automatisering. Equinor ser på muligheten for å koble på 3D-skanner i konseptet. På denne måten vil det være mulig å skanne både rør, tanker og annet utstyr med 3D-skanner. Ved hjelp av den teknologien, kan da roboten bli programmert ut ifra resultatet av skanningen. Det vil være mulig for roboten å vite hva den skal gjøre på det bestemte utstyret allerede før transport. For at dette skal være gjennomførbart, må det utarbeides en mulighet for å kunne simulere både sveise- og etterbehandlingsprosessen. Denne simuleringen må være 100% nøyaktig, da konsekvensene av å ødelegge rør eller tanker i drift vil være katastrofale.

Tankene om veien videre for konseptet on-site repair beveger seg mot det å automatisere prosesser som er krevende å gjennomføre. Både kvaliteten på arbeidet og sikkerheten til arbeiderne styrkes. Det går mot en enda mer HMS-vennlig bransje, noe som vil være viktig fremover, da de eldste anleggene bærer preg av korrosjonsskader. Det vil være nødvendig med mange reparasjonsoppdrag for å hindre uønskede hendelser. Sveisereparasjoner med påfølgende etterbehandling ved induksjon kan revolusjonere hvordan sveisereparasjoner utføres på olje- og gassanlegg. Dette vil hindre store mengder nedetid for olje- og gassanlegg, noe som resulterer i sparing av mange millioner kroner.

## 6. Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt identifisert en mulig metode å etterbehandle sveis på utstyr i drift. Induksjon som etterbehandlingsmetode har bidratt til signifikant hardhetsreduksjon i HAZ. Tempereringen, som følge av induksjon, har hatt større påvirkning på hardhet enn det ville vært med temper bead sveising. Slik som antatt var påvirkningen størst der hastigheten var lav og effekten høy. Det ble samlet nyttig kunnskap om denne metoden å temperere sveis på i samråd med programmering av både spole og robot. Roboten bidro til stabile prosesser, både med sveisepistol og induksjonsspole. Den har vist seg å være godt egnet til konseptet, men har potensialet til å bli optimalisert i enda større grad.

Etterbehandlingsmetoden har temperert de ønskede sonene i HAZ. Hardhetsmålingene viste at det ikke har oppstått nye soner med for høye hardhetsverdier. Med induksjon har det blitt oppnådd mikrostrukturer som svarer til tilfredsstillende nedkjølingstider mellom 800-500 °C. Ettersom referanseprøven inneholdt martensitt, har induksjon som etterbehandling bidratt til martensitt-nedbrytning og dermed hardhetsreduksjon. Det var noen feilkilder og usikkerhet knyttet til målingene, men flertallet av målingene anses likevel som godkjente grunnet de gode marginene.

Til tross for at det fortsatt er en vei å gå, viser resultatene at påvirkningen gjennom induksjon er god nok for å temperere sveis. Ettersom dette ikke er gjort før, vil det fortsatt være nødvendig med nøye testing og undersøkelser for å forsikre at det ikke har oppstått ytterligere problemer i materialet. For øyeblikket ser man bare fordeler med denne metoden, men det kan oppstå uforutsette utfordringer som må håndteres før metoden kan anvendes på utstyr i drift. Hardhet var tidligere et stort problem, men nå ser fremtiden for konseptet lysere ut. Resultatene i denne oppgaven underbygger ønsket om å videreutvikle konseptet on-site repair. Equinor er nå et skritt nærmere å realisere visjonen om mindre nedetid og store kostnadsbesparelser på olje- og gassanlegg.

## 7. Referanser

- [1] “General relationship between strength and hardness,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 529, pp. 62–73, Nov. 2011, Accessed: Apr. 27, 2020. [Online].
- [2] P. Smith, “Metallic Materials for Piping Components,” in *The Fundamentals of Piping Design*, P. Smith, Ed. Gulf Publishing Company, 2007, pp. 115–136.
- [3] G. Faraji, H. S. Kim, and H. T. Kashi, “Mechanical Properties of Ultrafine-Grained and Nanostructured Metals,” in *Severe Plastic Deformation*, G. Faraji, H. S. Kim, and H. T. Kashi, Eds. Elsevier, 2018, pp. 223–257.
- [4] W. A. Bruce and B. C. Etheridge, “Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding,” in *2012 9th International Pipeline Conference*, Jul. 2013, pp. 71–81, Accessed: Apr. 04, 2020. [Online].
- [5] W. A. Bruce, B. C. Etheridge, and A. Carman, “Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding,” in *2008 7th International Pipeline Conference*, Jun. 2009, pp. 1–9, Accessed: Apr. 04, 2020. [Online].
- [6] S. E. Hughes, “Materials and Their Weldability,” in *A Quick Guide to Welding and Weld Inspection*, S. E. Hughes, Ed. Woodhead Publishing, 2009, pp. 36–48.
- [7] L. C. A. C. T. F. R. John Case, “Tension and compression: direct stresses,” in *Strength of Materials and Structures*, L. C. A. C. T. F. R. John Case, Ed. Butterworth-Heinemann, 1999, pp. 12–54.
- [8] “What are the factors and effects of having a brittle and ductile fracture?,” *Quora*.  
<https://www.quora.com/What-are-the-factors-and-effects-of-having-a-brittle-and-ductile-fracture> (accessed May 01, 2020).
- [9] “Sprøhet – materialteknikk – Store norske leksikon,” *Store norske leksikon*.  
[https://snl.no/spr%C3%B8het\\_-\\_materialteknikk](https://snl.no/spr%C3%B8het_-_materialteknikk) (accessed Apr. 28, 2020).
- [10] H. Zhang, “The Basic Properties of Building Materials,” in *Building Materials in Civil Engineering*, H. Zhang, Ed. Woodhead Publishing, 2011, pp. 7–28.
- [11] “What is Tensile Strength? - Definition from Corrosionpedia,” *Corrosionpedia*.  
<https://www.corrosionpedia.com/definition/1072/tensile-strength> (accessed May 05, 2020).
- [12] W. D. Callister and D. G. Rethwish, *Callister’s Materials Science and Engineering*. Wiley, 2015.

- [13] “Tensile strength | Definition, Unit, & Facts,” *Encyclopedia Britannica*.  
<https://www.britannica.com/science/tensile-strength> (accessed May 05, 2020).
- [14] S. Aggarwal, “Welding lectures 1 3,” Oct. 06, 2014.  
<https://www.slideshare.net/surajaggarwal094/welding-lectures-1-3> (accessed May 04, 2020).
- [15] “Unusual cases of weld-associated cracking experienced in a high temperature catalyst reduction reactor,” in *Failure Analysis Case Studies II*, Pergamon, 2001, pp. 373–382.
- [16] P E Murray &, “Depth of penetration in gas metal arc welding,” *Sci. Technol. Weld. Joining*, vol. 4, no. 2, pp. 112–117, 1999.
- [17] W. Fricke, “IIW guideline for the assessment of weld root fatigue,” *Weld. World*, vol. 57, no. 6, pp. 753–791, Aug. 2013, Accessed: Feb. 26, 2020. [Online].
- [18] “The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 2, pp. 649–656, Jan. 2007, Accessed: Feb. 26, 2020. [Online].
- [19] “The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Processes on Different Welding Parameters,” *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1502–1506, Jan. 2012, Accessed: Feb. 26, 2020. [Online].
- [20] “Choosing shielding gases for arc welding.”  
<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/consumables/choosing-shieldng-gases-for-arc-welding> (accessed Mar. 02, 2020).
- [21] V. A. de Meneses, V. S. Leal, and A. Scotti, “Influence of Metal Transfer Stability and Shielding Gas Composition on CO and CO<sub>2</sub> Emissions during Short-circuiting MIG/MAG Welding,” *Soldagem Inspecao*, vol. 21, no. 3, pp. 253–268, 2016, Accessed: Mar. 02, 2020. [Online].
- [22] “7.11 GMAW/FCAW Shielding Gases,” *Halverson CTS*.  
<http://www.halversoncts.com/711-gmawfcaw-shielding-gases.html> (accessed Mar. 03, 2020).
- [23] “View of Effect of cooling rates on the weld heat affected zone coarse grain microstructure.”  
<https://metall-mater-eng.com/index.php/home/article/view/342/267> (accessed Feb. 28, 2020).
- [24] “Influence of the interpass temperature on t<sub>8/5</sub> and the mechanical properties of submerged arc welded pipe,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, pp. 152–159, Dec. 2016, Accessed: Feb. 27, 2020. [Online].

- [25] R. S. Chandel & S. R. Bala, "Cooling Time and Features of Submerged Arc Weld Beads," *Welding Journal*, 1985, [Online]. Available: [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1985\\_07\\_s201.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1985_07_s201.pdf).
- [26] Small Arms Factory, "TTT diagram," Nov. 18, 2013. <https://www.slideshare.net/RakeshSingh125/tt-tdiagram> (accessed May 27, 2020).
- [27] K. Zhang, "Experimental and Computational Investigation of Temper Bead Welding and Dissimilar Metal Welding for Nuclear Structures Repair," Page 11, The Ohio State University, 2016.
- [28] "Characterization of martensite-austenite constituents and micro-hardness in intercritical reheated and coarse-grained heat affected zones of API X70 HSLA steel," *Mater. Charact.*, vol. 142, pp. 321–331, Aug. 2018, Accessed: Feb. 13, 2020. [Online].
- [29] "Austenite Martensite Bainite Pearlite and Ferrite structures." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-microstructural-constituents-austenite-martensite-bainite-pearlite-and-ferrite.aspx> (accessed May 24, 2020).
- [30] "Bainitic steels and alloys for power plants," in *Structural Alloys for Power Plants*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 153–187.
- [31] "What is Gas Metal Arc Welding? (MIG Welding / MAG Welding)." [twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-mig-mag-welding.aspx](https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-mig-mag-welding.aspx) (accessed Feb. 11, 2020).
- [32] "Joining for lightweight vehicles," in *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 275–308.
- [33] *Effect of Temperature on Rock Fracture*. Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 111–133.
- [34] "MIG/MAG-sveising - Kemppi," *Kemppi*. <https://www.kemppi.com/no/stotte/sveise-abc/mig-mag-sveising/> (accessed Feb. 11, 2020).
- [35] "Detail - Hobart Brothers Performance Welding Products." <https://www.hobartbrothers.com/news/233/523/Tips-for-Choosing-a-Solid-Wire-for-Welding-Applications.html> (accessed Mar. 11, 2020).
- [36] W. J. Sperko, "Exploring temper bead welding," *Welding journal*, vol. 84, no. 7, pp. 37–40, 2005, Accessed: Feb. 12, 2020. [Online].
- [37] ASME, "Boiler and pressure vessel code, Section IX" ASME, 2010.



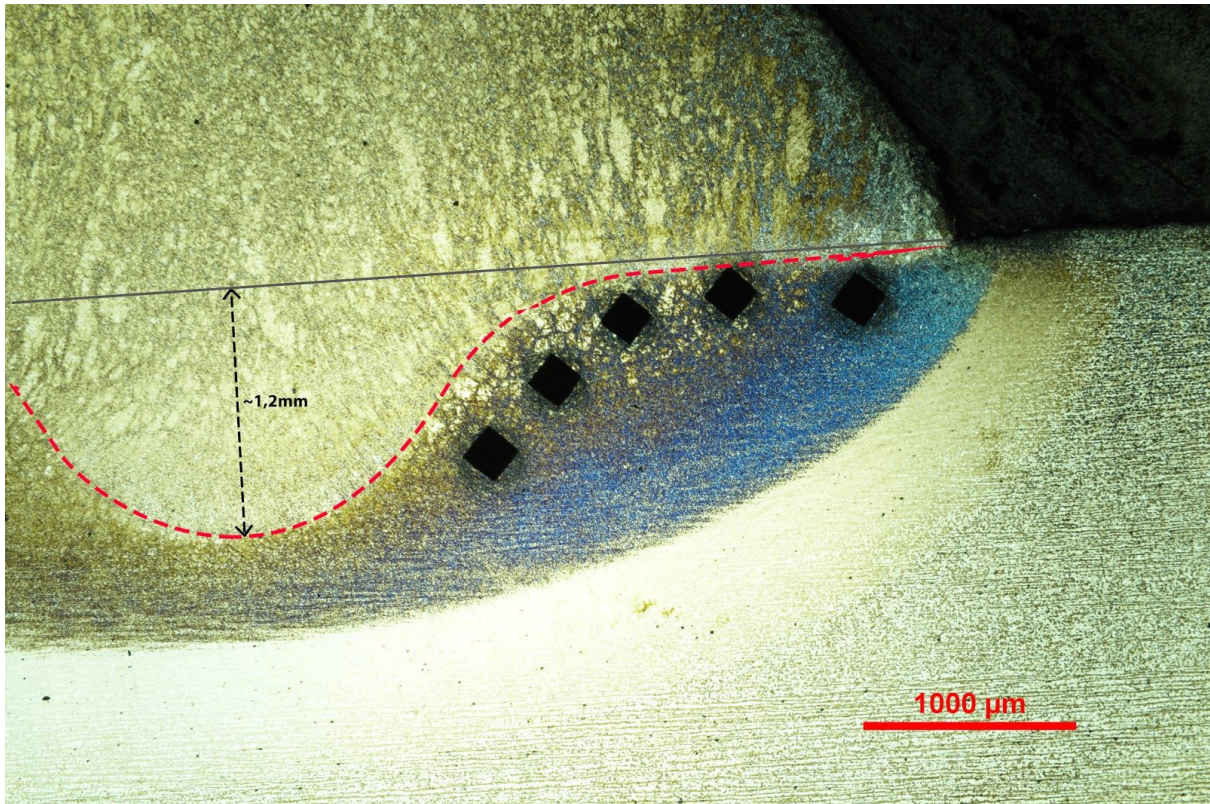
- [38] T. W. Lau, M. L. Lau, and G. C. Poon, "Development of controlled deposition repair welding procedures at Ontario Hydro," *Bulletin - Welding Research Council*, pp. 35–42, 1996, Accessed: Feb. 12, 2020. [Online].
- [39] Welding Technical Institute of Australia, "Temper Bead Welding," *TGN-PE-02*, 2002.
- [40] A. K. Lahiri, "Metallurgical Aspects of Welding," in *Applied Metallurgy and Corrosion Control*, Springer, Singapore, 2017, pp. 141–176.
- [41] S. Srisutraporn, R. Paoniam, B. Poopat, and S. Kwankaew, "Effect of tempered bead techniques on maximum HAZ hardness for in service pipeline welding," *MATEC Web of Conferences*, vol. 192, p. 01046, 2018, Accessed: Mar. 02, 2020. [Online].
- [42] "Kobelco - Kobe steel."  
[https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC\\_2000-04.html](https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_2000-04.html)  
(accessed Mar. 03, 2020).
- [43] "Heat input and its effects on material properties."  
<https://www.esabna.com/us/en/education/blog/heat-input-and-its-effects-on-material-properties.cfm> (accessed Mar. 03, 2020).
- [44] "Effect of welding speed on microstructures, mechanical properties and corrosion behavior of GTA-welded AISI 201 stainless steel sheets," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 2, pp. 402–408, Feb. 2014, Accessed: Apr. 25, 2020. [Online].
- [45] S. Chauhan, "Arc Length, Weld Speed and Welding Current," *Magento2 Store*, Feb. 11, 2019.  
<https://www.longevity-inc.com/welding-articles/post/arc-length-weld-speed-and-welding-current/> (accessed Apr. 25, 2020).
- [46] "How To Calculate Heat Input From Welding,"  
<http://weldinganswers.com/how-to-calculate-heat-input/> (accessed Mar. 03, 2020).
- [47] "Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3617–3623, Jun. 2011, Accessed: May 02, 2020. [Online].
- [48] G. Mohammed, M. Ishak, S. Aqida, and H. Abdulhadi, "Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex Stainless Steels: A Review," *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, vol. 7, no. 2, p. 39, Jan. 2017, Accessed: May 29, 2020. [Online].

- [49] “The Welding Heat Input Has an Important Effect on the Weldment’s Properties.” <https://www.welderdestiny.com/welding-heat-input.html> (accessed Mar. 03, 2020).
- [50] P. Kah and J. Martikainen, “Influence of shielding gases in the welding of metals,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 9, pp. 1411–1421, Apr. 2012, Accessed: Mar. 16, 2020. [Online].
- [51] B. Mvola and P. Kah, “Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9, pp. 2369–2387, Jun. 2016, Accessed: Mar. 16, 2020. [Online].
- [52] Yu-Ichi Ikegami, Hideki Miyauchi, Shin’ya Yamamoto & Masato Uchihara, “Shielding gases for improved GMAW and GTAW processes,” *Welding Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 187–195, Jul. 2010.
- [53] R. S. Funderburk, *Welding Innovation*, vol. 15. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1998.
- [54] “Definition of Induction.” <https://www.merriam-webster.com/dictionary/induction> (accessed May 03, 2020).
- [55] “Electromagnetic Induction: Definition, Applications, Laws, Videos,” *Toppr-guides*, Feb. 01, 2018. <https://www.toppr.com/guides/physics/magnetic-effects-of-electric-current/electromagnetic-induction-and-its-applications/> (accessed Apr. 22, 2020).
- [56] H. Mouritsen, “Magnetoreception in Birds and Its Use for Long-Distance Migration,” in *Sturkie’s Avian Physiology*, Academic Press, 2015, pp. 113–133.
- [57] “Elektromagnetisk induksjon - Energisenteret,” *Energisenteret*. <https://eis.no/energikilder/elektromagnetisk-induksjon/> (accessed Feb. 13, 2020).
- [58] “Electromagnetic Induction,” *IGCSE Physics*, Aug. 07, 2017. <https://0625physics.wordpress.com/2017/08/07/first-blog-post/> (accessed Mar. 24, 2020).
- [59] “Induction Heating: What It Is, How it Works.” [http://www.gh-ia.com/induction\\_heating.html](http://www.gh-ia.com/induction_heating.html) (accessed Feb. 13, 2020).
- [60] “Applications For Induction Heating: An FAQ For Beginners by Brett DalyDirectIndustry.” <https://trends.directindustry.com/ambrell/project-7238-173513.html> (accessed Mar. 24, 2020).

- [61] R. D. O. Induction, "Components of induction heating," *RDO Induction - Induction Heating Solutions*.  
<https://rdoinduction.com/components-of-induction-heating.html> (accessed May 21, 2020).
- [62] "What Is Induction Heating?"  
<https://www.comsol.co.in/multiphysics/induction-heating> (accessed Feb. 13, 2020).
- [63] "Air Liquide - TERAL 22 - Gasekatalog."  
<https://produkte.airliquide.de/loesungen/produkte/gasekatalog/markengase/teral22.html> (accessed May 29, 2020).

## 8. Vedlegg

### Vedlegg 1: Innbrenningsprofil X5 bunn



## Vedlegg 2: Populærvitenskapelig artikkel

### Sveisereparasjon av korrosjonsskader i fremtiden

**Det er et stort potensiale for kostnadsbesparelser i olje- og gassindustrien. Sveisereparasjoner utføres ved planlagte nedstengninger på olje- og gassanlegg sammen med andre vedlikeholdsoppdrag. Produksjonstapene som kommer av nedetiden overskrider millioner av kroner hver eneste dag. Hva om nedetiden kunne blitt redusert med en dag eller to? Equinor tar sikte på å gjennomføre sveisereparasjoner på utstyr i drift.**

Det verste som kan skje i olje- og gassindustrien er akutte nedstengninger. På olje- og gassanlegg blir det utført periodiske nedstengninger med 2-4 års intervaller for å unngå akutte nedstengninger. Ved planlagte nedstengninger vil det være flere planlagte reparasjoner og inspeksjoner som foregår samtidig. Når det oppstår en akutt nedstengning vil produktiviteten på reparasjonen være betydelig dårligere og arbeidet vil heller ikke være budsjettet. Et viktig mål i alle typer industri er kostnadsbesparelser. Et potensielt område for kostnadsbesparelse i olje- og gassindustrien er blant annet nedetid og produksjonstap. Nedstengning av et olje- og gassanlegg fører til millioner av kroner i produksjonstap hver eneste dag, noe som indikerer at potensialet rundt disse besparelsene er store. Det er derfor av stor interesse å

minimere nedetiden ved de planlagte nedstengningene, hindre akutte nedstengninger og samtidig få gjennomført nødvendig vedlikehold.



*Osebergfeltet: En oljeplattform i Nordsjøen [1].*



## Klokken tikker

Olje- og gassindustrien har i flere år benyttet stål i konstruksjoner, rør og tanker. Materialer har begrenset levetid og de eldre olje- og gassanleggene lider av dette. Et mulig utfall er at et materiale skal svikte og utløse en dominoeffekt, noe som potensielt kan føre til skader på mennesker og miljø. Svikt kan blant annet oppstå som en konsekvens av korrosjon. En tommelfingerregel er at korrosjon vanligvis forekommer i kontakt med vann. I olje- og gassindustrien er det et stort antall rør og tanker som påvirkes av korrosjon. Korrodering av stålrør og ståltanker vil føre til svekkelse av materialet. For å forhindre uønskede hendelser er det nødvendig å gjennomføre reparasjoner av skadene som korrosjon påfører.

Den vanligste metoden å reparere korrosjonsskader på er ved sveisereparasjon. En vanlig sveiseprosedyre er å sammenføye materialer ved smelting. Sveisereparasjon av en korrosjonsskade foregår ved at det tilføres smeltet metall i det korroderte området. Målet med sveisereparasjonen er å forhindre at gropene eller sprekkene utvikler seg og forårsaker svikt.



*Migatronics sveiserobot CoWelder [1].*

## Går for automatisering

On-site repair er et konsept som utvikles av Equinor. I konseptet tas det i bruk sveising med robot, da det er mer stabilt og HMS-vennlig enn ved bruk av en dyktig sveiser. På den måten minimeres sjansen for skader på personell, ettersom roboten kan programmeres, overvåkes og styres på avstand. Robotsveising tilbyr generelt en mer stabil sveiseprosess og lengre perioder med sveising uten behov for pause.

Likevel kan det oppstå problemer med sveising på utstyr i drift, til tross for bruk av robot. Det kommer av at det på for eksempel rør og tanker er medium med kjøleeffekt på innsiden. Dette fører til rask nedkjøling i området rundt sveisen. Konsekvensen av dette er en høy hardhet i materialet som kan medføre svikt forårsaket av sprøhet.

Som en mulig metode for å løse hardhetsproblemet er det sett på bruk av induksjon som etterbehandlingsmetode for å temperere området rundt sveisen, og dermed oppnå en langsommere nedkjøling. Induksjonen i en slik prosess vil være lik den som skjer på en induksjonsovn på kjøkkenet, bare at varmen vil være mer konsentrert. Induksjon som etterbehandlingsmetode er testet på en sveis på en karbonstål plate med sirkulerende vann på baksiden. I denne prosessen er det montert på en induksjonsspole på robotarmen.

### **På stødig kurs mot millionbesparelser**

Metoden har vist seg å fungere, da det er observert en signifikant hardhetsreduksjon i prøvene. For øyeblikket ser man kun fordeler med denne metoden, men det kan fortsatt oppstå uforutsette utfordringer som må håndteres før metoden kan anvendes på utstyr i drift. For høy hardhet i materialet var tidligere et stort problem, men nå ser fremtiden for konseptet lysere ut. Equinor er nå et skritt nærmere å realisere visjonen om mindre nedetid og store kostnadsbesparelser på olje- og gassanlegg.

#### **Bildereferanser**

- [I] “Olje og gass | Alt du bør vite | Strøm.no.”  
<https://xn--strm-ira.no/olje-gass-str%C3%B8m-energikilde> (accessed Jun. 05, 2020).
  
- [II] M. A/s, “CoWelder™ | Your new welding assistant is a robot,” *Migatronik A/S*.  
<https://www.migatronik.com/en/products-and-solutions/welding-machines/cowelder/>  
(accessed Jun. 05, 2020).

# Vedlegg 3: Risikovurdering

## RISIKOANALYSE

Enhet/Institutt:	Institutt for materialteknologi	Dato opprettet:	17/1/2020
Ansvarlig linjeleder (navn):	Tor Grande	Sist revidert:	8/5/2020
Ansvarlig for aktiviteten som	Ståle Singstad Stegavik, Jørgen Kristensen og Thomas Stolpnes		
Deltakere (navn):	Ståle Singstad Stegavik, Jørgen Kristensen og Thomas Stolpnes		

### Beskrivelse av den aktuelle aktiviteten, området mv.:

Metallografiske undersøkelser og hardhetstesting på en sveiseprøve med ASTM SA 516 GR. 70 stål.

Aktivitet/arbeidsoppgave	Mulig uønsket hendelse	Eksisterende risikoreducerende tiltak	Vurdering av sannsynlighet (S)	Vurdering av konsekvens (K) <i>Vurder en konsekvenskategori om gangen. Menneske skal alltid vurderes.</i>					Risikoverdi (S x K)	Forslag til forebyggende og/eller korrigerende tiltak <i>Prioriter tiltak som kan forhindre at hendelsen inntreffer (sannsynlighetsreducerende tiltak) foran skjerpet beredskap (konsekvensreducerende tiltak)</i>	Restrisiko etter tiltak (S x K)
				(1-5)	Menneske (1-5)	Øk/materiell (1-5)	Ytre miljø (1-5)	Omdømme (1-5)			
Sliping og polering	Kuttskader	Hansker er alltid tilgjengelig på laben	3	2	1	1	1	6	HMS-kurs, bruke verneutstyr	2	
Kapping av sveiseprøver	Sprut på øyet	Vernebriller er alltid tilgjengelig på laben, og det er beskyttelsesvisir på kappsaga.	1	3	1	1	1	3	HMS-kurs, bruke verneutstyr	1	
	Feilhåndtering av instrument		2	1	1	1	1	2	Opplæring i bruk av instrumentet	1	
Håndtering av prøver	Kuttskader	Hansker er alltid tilgjengelig på laben	3	2	1	1	1	6	HMS-kurs, bruke verneutstyr	2	
Etsing av prøve for å kunne se overganger i HAZ (2% nital-løsning)	Kontakt med hud og øyne	Hansker og briller er alltid tilgjengelig på labben	2	3	1	1	1	6	HMS-kurs, bruke verneutstyr	2	

### Sannsynlighet vurderes etter følgende kriterier:

1 – Svært liten	2 – Liten	3 – Middels	4 – Stor	5- Svært stor
1 gang pr. 50 år eller sjeldnere Ergonomi/psykososialt: Ingen tilfeller	1 gang pr. 10 år eller sjeldnere Ergonomi/psykososialt: Ett enkelt tilfelle	1 gang pr. år eller sjeldnere Ergonomi/psykososialt: Enkelttilfeller	1 gang pr. måned eller sjeldnere Ergonomi/psykososialt: Periodevis	Daglig – hver uke Ergonomi/psykososialt: Kontinuerlig

### Konsekvens vurderes etter følgende kriterier:

Gradering	Menneske	Ytre miljø	Økonomi/materiell	Omdømme
5 – Svært alvorlig	Død eller uførhet/ varig nedsatt funksjonsevne	Svært langvarig og ikke reversibel skade	Drifts- eller aktivitetsstans > 1 år	Troverdighet og respekt betydelig og varig svekket
4 – Alvorlig	Alvorlig skade/ belastning som krever medisinsk behandling. Mulig uførhet/ varig nedsatt funksjonsevne.	Langvarig skade Lang restitusjonstid	Driftsstans > ½ år Aktivitetsstans opptil 1 år	Troverdighet og respekt betydelig svekket
3 – Moderat	Alvorlig skade/ belastning som krever medisinsk behandling. Lang restitusjonstid.	Mindre skade og lang restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1 måned	Troverdighet og respekt svekket
2 – Liten	Skade/ belastning som krever medisinsk behandling. Reversibel skade. Kort restitusjonstid.	Mindre skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1 uke	Negativ påvirkning på troverdighet og respekt
1 – Svært liten	Mindre skade/ belastning som krever enkel behandling. Reversibel skade/ belastning. Kort restitusjonstid.	Ubetydelig skade og kort restitusjonstid	Drifts- eller aktivitetsstans < 1 dag	Liten påvirkning på troverdighet og respekt

### Risikoverdi = Sannsynlighet x Konsekvens:

KONSEKVENNS	5 – Svært alvorlig	4 – Alvorlig	3 – Moderat	2 – Liten	1 – Svært liten
	5 – Svært alvorlig	5	4	3	2
4 – Alvorlig	10	8	6	4	2
3 – Moderat	15	12	9	6	3
2 – Liten	20	16	12	8	4
1 – Svært liten	25	20	15	10	5
	1 - Svært liten	2 - Liten	3 - Middels	4 - Stor	5 - Svært stor
SANNSYNLIGHET					

### Fargene angir grad av risiko:

Rød	<span style="color: red;">■</span>	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres.
Gul	<span style="color: yellow;">■</span>	Middels risiko. Tiltak skal vurderes.
Grønn	<span style="color: green;">■</span>	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes