



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og Materialer <i>Fordypning:</i> Offshore Konstruksjoner	Vårsemesteret, 2012 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Lene M. Lithun (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Vidar Hansen Veiledere: Vidar Hansen (UiS) Terje Sund (Statoil)	
Tittel på masteroppgaven: Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Sveising, Hardhet, Forvarme, Karbonstål, TIG, Korrosjon, Vedlikehold	Sidetall: 88 + vedlegg/annet: 132 Stavanger, 15. juni 2012



Universitetet
i Stavanger

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Sammendrag

Problemstillingen for denne oppgaven har vært: «I forbindelse med reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål, hvilke sveisetekniske parametere har størst innflytelse når målet er å tilfredsstillende krav til maksimal hardhet i sveiseområdet?». Dette har blitt løst ved eksperimentelt og teoretisk arbeid på Universitetet i Stavanger sammen med en vurdering av resultater fra testing utført av Exova på oppdrag fra operatør og kontraktør.

Problemstillingen er svært aktuell, da det i dag er flere eldre olje og gass-installasjoner i Nordsjøen der karbonstål er en stor del av materialbildet. Det har vist seg å være vanskelig å kvalifisere sveiseprosedyrer for reparasjonssveising av tetteflater i karbonstål, der det stilles strenge krav til maksimal hardhet. Slike krav stilles til strømningsrør med H₂S-holdige produksjonsfluider, ofte omtalt som «sur service». Dette er sure miljøer, grunnet et ugunstig nivå av H₂S og blant annet fritt vann¹. I slike miljøer ligger krav til maksimal hardhet i sveisesone og grunnmateriale på 250 HV10 ved påleggssveising. Hardhetskravet er satt for å minimere sjansen for at H₂S-spenningskorrosjon skal oppstå. Denne type spenningskorrosjon fører til hurtigvoksende sprekker i materialet som følge av indre spenninger kombinert med en lite duktil mikrostruktur. De indre spenningene i mikrostrukturen oppstår ved at H-atomer diffunderer inn i overflaten på materialet og re-kombineres til H₂, som krever mer plass enn enkeltvis fordelte H-atomer.

Testresultatene som blir presentert i denne oppgaven setter lys på viktigheten av kontrollert avkjølingshastighet i sveisesonen samt kjemisk innhold av sveisetilsett. I tillegg har effekten av spenningsgløding blitt undersøkt i forbindelse med de relevante testmaterialer og sveisekjemier. Teoretiske beregningsmodeller for hardhet er dessuten benyttet for å sammenligne og vurdere ulike scenarier.

Avkjølingshastigheten avhenger av fysiske dimensjoner samt tilført varme til arbeidsstykket. Det kan være vanskelig å forutse avkjølingshastigheten for hele sveiseforbindelsen, da man vil ha et bredt spekter av temperaturgradienter og i tillegg oppnår varmebehandling av foregående sveisestrenger. Valg av kjemisk sammensetning i sveisetilsett har dessuten vist seg å spille en svært viktig rolle. Det vil ofte være mer effektivt å bruke en nøye utvalgt sveisetilsett-kjemi som tolererer et større intervall av avkjølingshastigheter for å oppnå mikrostruktur med ønskelige mekaniske egenskaper. Hardheten må holdes på et minimumsnivå, men samtidig ønsker man ikke å svekke styrken i endelig produkt.

Opgaven avsluttes med en lengre diskusjon som munner ut i en konklusjon der problemstillingen blir besvart. En av sveiseprosedyrene som har blitt testet har gitt hardhetsverdier som ligger like over kravet på maksimalt 250 HV, men dette er begrenset til et mindretall av målingene. Konklusjonen avslutter med noen anbefalinger for ytterligere forbedringer basert på denne, med mål om å kvalifisere en ny sveiseprosedyre som skal kunne gi et tilfredsstillende hardhetsnivå. Det blir foreslått konkrete endringer i sveisetilsettets kjemi, som kan bidra til å løse problemet.

¹ Vann som ikke er bundet opp i olje eller gass, også kalt formasjonsvann.

Forord

Eksperimentelt arbeid knyttet til denne masteroppgaven er utført ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven ble til etter et forslag fra Terje Sund i Statoil, som også har vært min veileder fra bedrift. Veileder ved UiS har vært Vidar Hansen.

Jeg vil takke begge mine veiledere for gode diskusjoner, viktige innspill og faglig veiledning, men med en spesiell takk til Terje Sund for en interessant oppgave, der læringskurven har vært bratt. Jeg vil også rette en takk til kontaktpersoner hos diverse kontraktører tilknyttet Statoil som har bidratt med materialer for videre testing samt mye nyttig dokumentasjon.

For hjelp med utstyr på laboratoriet og gode råd i det eksperimentelle arbeidet vil jeg takke Jan Kåre Bording og Ingunn Cecilie Oddsén.

Til sist vil jeg takke min tålmodige samboer, Emil Ruus Simensen, som har vært en god mental støtte i tillegg til å bidra med faglige innspill samt korrekturlesing.

Stavanger, 15. juni 2012

Lene M. Lithun

Innholdsliste

Sammendrag	i
Forord.....	ii
Innholdsliste.....	iii
Figurliste.....	vi
Tabelliste	viii
Forkortelser og definisjoner.....	ix
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Introduksjon til arbeidet med problemstillingen	3
2 Teori.....	6
2.1 Jern-karbon legering (Fe-C)	6
2.1.1 Korrosjon av karbon- og lavlegerte stål.....	7
2.2 Sveisemetallurgi	7
2.2.1 Avkjølingshastighet.....	8
2.2.2 Størkning av sveisemetall.....	11
2.2.3 Mikrostruktur i sveisemetall.....	13
2.3 Herdemekanismer i stål.....	17
2.4 Legeringselementers påvirkning av mekaniske egenskaper til stål	18
2.4.1 Karbon	18
2.4.2 Mangan.....	18
2.4.3 Silisium.....	19
2.4.4 Krom	19
2.4.5 Molybden	19
2.4.6 Nikkel.....	19
2.4.7 Kobber	19
2.4.8 Vanadium og Niob	19
2.4.9 Aluminium	19
2.4.10 Titan.....	19
2.4.11 Bor	19
2.5 Sveisbarhet	20
2.6 Generell sveiseteori.....	21

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

2.6.1	Varmeomsetting i arbeidsstykket.....	22
2.6.2	Sveiseparametere.....	23
2.6.3	Buesveisemetoder.....	25
2.6.4	Varmebehandling av sveis.....	28
2.6.5	Sveiseprosedyredokumentasjon.....	31
2.7	Sprekkfenomen ved sveising.....	33
2.8	Mekanisk prøving.....	34
2.8.1	Vickers hardhetsmåling.....	34
3	Tidligere testing.....	35
3.1	Testmaterialer.....	35
3.1.1	Testserie 1: Blindhub.....	35
3.1.2	Testserie 2: Rør.....	40
3.1.3	Testserie 3: Stang.....	43
3.2	Sveisetilsett.....	44
3.2.1	Tilsett A.....	44
3.2.2	Tilsett B.....	44
4	Eksperimentelt.....	45
4.1	Utstyr.....	45
4.1.1	Skjæring.....	45
4.1.2	Sliping og polering.....	45
4.1.3	Varmebehandling av sveis.....	46
4.1.4	Stereolupe.....	46
4.1.5	Metallmikroskop.....	47
4.1.6	Vickers mikrohardhetsmåler.....	47
4.2	Fremgangsmåte.....	48
4.2.1	Bearbeiding av prøvestykker.....	48
4.2.2	Teoretisk beregning av Vickers hardhet i sveisemetall.....	50
4.2.3	Spenningsgløding av prøvestykker.....	51
4.2.4	Metallmikroskop.....	52
4.2.5	Vickers mikro hardhetsmåling.....	52
5	Resultat.....	55
5.1	Testserie 1: Blindhub.....	56
5.1.1	Test 1.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall.....	56

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

5.1.2	Test 1.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen.....	58
5.1.3	Oppsummering av test 1.1 og 1.2 - Blindhub.....	60
5.2	Testserie 2: Rør.....	61
5.2.1	Test 2.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall.....	61
5.2.2	Test 2.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen.....	63
5.2.3	Oppsummering av test 2.1 og 2.2 - Rør.....	65
5.3	Testserie 3a: Stang.....	66
5.3.1	Test 3.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall.....	66
5.3.2	Test 3.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen.....	68
5.3.3	Oppsummering av test 3.1 og 3.2 - Stang.....	70
5.4	Testserie 3b og 3c: Stang.....	71
5.5	Teoretisk beregning av Vickers hardhet i sveisemetall.....	73
5.5.1	Sveisetilsett A.....	74
5.5.2	Sveisetilsett B.....	76
5.5.3	Oppsummert.....	78
5.6	Andre funn.....	79
6	Diskusjon.....	80
7	Konklusjon.....	85
8	Referanser.....	86
9	Vedlegg.....	88
Vedlegg A:	Materialsertifikater.....	I
Vedlegg B:	Utdrag fra testsertifikat.....	XIV
Vedlegg C:	Tabeller fra eksperimentelt arbeid.....	XXIV
Vedlegg D:	Utdrag fra standard.....	XXXII

Figurliste

Figur 1.1: Bilde som illustrerer hvordan to hubber monteres sammen.	1
Figur 1.2: Tverrsnitt av en hub og to hubber med mekanisk kobling og pakning.	2
Figur 1.3: Illustrasjon som viser geometrisk form for rør, stang og blindhub.	4
Figur 2.1: Fe-C-fasediagram for stål og kubisk flatesentrert og kubisk romsentrert gitterstruktur.	6
Figur 2.2: Skisse av en sveiseforbindelse med ulike temperatursoner ved sveising.	7
Figur 2.3: Temperaturforløpet i materialet under sveising og avkjølingshastighet.	8
Figur 2.4: Tre- og todimensjonal varmeledning i grunnmaterialet.	9
Figur 2.5: CCT-diagram for to forskjellige Fe-C legeringer.	10
Figur 2.6: Illustrasjon av epitaktisk vekst av søylekrystaller og energibarrieren mot kimdannning.	11
Figur 2.7: Illustrasjon som viser vekst av søylekrystaller.	12
Figur 2.8: Bilde av mikrostruktur.	13
Figur 2.9: Dannelse av mikrostruktur.	14
Figur 2.10: TTT-diagram som viser avkjølingsområdet for omvandling av martensitt.	15
Figur 2.11: Skisse for en rom-sentrert tetragonal struktur (BCT).	16
Figur 2.12: Skisse av en typisk sveiseforbindelse med tilhørende soner.	21
Figur 2.13: Skisse som viser inndelingen av HAZ etter mikrostruktur.	21
Figur 2.14: Typiske innbrenningsprofiler ved forskjellige beskyttelsesgass.	24
Figur 2.15: Prinsippskisse for TIG-sveising.	25
Figur 2.16: Prinsippskisse for sveising med dekket elektrode.	26
Figur 2.17: Prinsippskisse for rørstrådsveising.	27
Figur 2.18: Nomogram for å bestemme forvarmingstemperatur.	29
Figur 2.19: Anbefalt varmebehandlingstemperatur for ulegert stål.	30
Figur 2.20: Flytdiagram for utvikling av sveiseprosedyredokumentasjon.	32
Figur 2.21: Mekanisme for hydrogenopptak ved sprekkvekst.	33
Figur 2.22: Prinsippskisse for måling av Vickers hardhet.	34
Figur 3.1: Bilde av en halv blindhub.	35
Figur 3.2: Dimensjoner for blindhub og snitt A og B for hardhetsmålinger.	37
Figur 3.3: Hardhetsmålinger tatt på blindhub i snitt A.	38
Figur 3.4: Hardhetsverdier tatt på den reparasjonssveisede tetteflaten på blindhub.	39
Figur 3.5: Skisse som viser snitt A til E.	40
Figur 3.6: Gjennomsnitt av hardhetsmålinger knyttet til test 2a, b og c, med standardavvik.	41
Figur 3.7: Gjennomsnittskurve for test 2a, b og c, med standardavvik.	42
Figur 3.8: Test 3b med gjennomsnittlige hardhetsmålinger tatt i snitt E.	42
Figur 3.9: Gjennomsnittlige hardhetsmålinger for testserie 3, med standardavvik.	43
Figur 4.1: Maskiner som ble brukt til grovkutting og finkutting.	45
Figur 4.2: Slipemaskin og prøveholder for jevn sliping og polering av prøvebiter.	45
Figur 4.3: Ovn brukt ved spenningsgløding av utvalgte prøvestykker.	46
Figur 4.4: Stereolupe av typen Leica MZ 12,5.	46
Figur 4.5: Metallmikroskop av typen Reichert-Jung MeF3.	47
Figur 4.6: Vickers mikrohardhetsmåler.	47
Figur 4.7: Oppdeling av makroene A, B, D og E.	48
Figur 4.8: Makro C.	48
Figur 4.9: Skjerm bilde av regneark.	50
Figur 4.10: Tid-Temperatur-diagram for ettervarmingen av prøvestykker.	51
Figur 5.1: Bilder av mikrostruktur.	56

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Figur 5.2: Målinger tatt i sveisemetallet til tetteflaten.	57
Figur 5.3: Bilder av mikrostruktur.	58
Figur 5.4: Hardhetsmålinger fra tetteflaten på blindhub.	59
Figur 5.5: Bilder av mikrostruktur.	61
Figur 5.6: Hardhetsmålinger tatt på tvers gjennom sveisemetall	62
Figur 5.7: Bilder av mikrostruktur	63
Figur 5.8: Hardhetsmålinger fra rør.....	64
Figur 5.9: Bilder av mikrostruktur.	66
Figur 5.10: Presentasjon av hardhetsmålinger tatt i sveisemetall for stang	67
Figur 5.11: Bilder av mikrostruktur.	68
Figur 5.12: Grafisk fremstilling av hardhetsdistribusjonen i sveiseforbindelsen til stang	69
Figur 5.13: Bilde som viser hvor de ulike snitt er tatt i forbindelse med hardhetstesting.....	71
Figur 5.14: Figur som viser snitt I og J for hardhetsmåling.	71
Figur 5.15: Hardhetsmålinger utført av Exova i snitt A - H på testserie 3b og 3c.	72
Figur 5.16: Hardhetsmålinger utført av Exova i snitt I og J for testserie 3b og 3c.	72
Figur 5.17: Beregnet hardhet og avkjølingshastighet som funksjon av tilført varme.	74
Figur 5.18: Beregnet hardhet og avkjølingshastighet som funksjon av tilført varme.	75
Figur 5.19: Beregnet hardhet og avkjølingshastighet som funksjon av tilført varme.	76
Figur 5.20: Beregnet hardhet og avkjølingshastighet som funksjon av tilført varme	77
Figur 5.21: Polert flate av makro tatt fra rør.....	79
Figur 5.22: Ulike deler av sveis som har innblanding av annen sveisetråd.	79
Figur 6.1: Gjennomsnittkurve for hardhetsmålinger tatt av Exova for testserie 2, 3a, 3b og 3c.....	82
Figur 6.2: Beregnede hardhetsverdier for testserie 2 og 3a - c. Med en virkningsgrad på 0,45.....	83

Tabelliste

Tabell 2.1: Kjente buesveisemetoder	25
Tabell 2.2: De tre belastningsområdene som Vickersprøving er delt inn i	34
Tabell 3.1: Testmaterialenes egenskaper i levert tilstand.	35
Tabell 3.2: Kjemisk sammensetning av sveisemetall og grunnmateriale for blindhub.....	36
Tabell 3.3: Hardhetsverdier målt på blindflens på operatørs testsenter.....	36
Tabell 3.4: Maksimale hardhetsverdier funnet ved testing av produksjonstest.....	40
Tabell 3.5: Maksimale hardhetsverdier funnet i sveiseforbindelsens tre soner for test 2a, b og c.....	41
Tabell 3.6: Maksimale hardhetsverdier funnet i sveisemetall, HAZ og grunnmateriale.	43
Tabell 3.7: Typisk kjemisk sammensetning for tilsett A	44
Tabell 3.8: Typisk kjemisk sammensetning for tilsett B.	44
Tabell 4.1: System for identifikasjon av de ulike prøvebitene.	48
Tabell 4.2: Smergelpapir brukt for sliping av prøvebiter.....	48
Tabell 4.3: Poleringsspray og matter brukt	49
Tabell 4.4: Nitalløsning	49
Tabell 4.5: Hardhetstesting 1.1 og 1.2 på blindhub.	52
Tabell 4.6: Hardhetstesting 2.1 og 2.2 på rør.....	53
Tabell 4.7: Hardhetstesting 3.1 og 3.2 på stang.	54
Tabell 5.1: Materialer fra kontraktør som har blitt testet i forbindelse med denne oppgaven.	55
Tabell 5.2: Gjennomsnittsmålinger og maksimale verdier for testserie 1	60
Tabell 5.3: Gjennomsnittsmålinger og maksimale verdier for testserie 2	65
Tabell 5.4: Gjennomsnittsmålinger og maksimal hardhet for testserie 3a.....	70
Tabell 5.5: Sveiseteknisk informasjon fra testserie 3b og 3c	71
Tabell 5.6: Inputdata nødvendig for beregning av maks HV og avkjølningshastighet.....	73
Tabell 5.7: Kjemisk sammensetning for sveisetilsett A og B.	73
Tabell 5.8: Beregning av avkjølningshastighet og maksimal hardhet for testserie 2.....	74
Tabell 5.9: Beregning av avkjølningshastighet og maksimal hardhet for testserie 3b.....	75
Tabell 5.10: Beregning av avkjølningshastighet og maksimal hardhet for testserie 3a.....	76
Tabell 5.11: Beregning av avkjølningshastighet og maksimal hardhet for testserie 3c.....	77
Tabell 5.12: Beregnede og målte hardhetsverdier for testserie 2 og 3a – c.....	78
Tabell 6.1: Tabell over de viktigste variablene fra sveisedokumentasjon og resultater.....	81

Forkortelser og definisjoner

%[grunnstoff]	Der det skrives %[grunnstoff] i denne oppgaven, menes det alltid vekt%
AF	"Acicular ferrite" - Aciculær ferritt, også kalt nåleferritt
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BCC	"Body-centered cubic" - Kubisk romsentrert
BCT	"Body-centered tetragonal" - Romsentrert tetragonal
CCT	Continuous Cooling Transformation - Diagram for kontinuerlig avkjøling
CE	Carbon Equivalence - IIW karbonekvivalent
DT	Destructive Testing
F	Ferritt, korngrenseferritt og ekviakset ferritt.
FCC	"Face-centered cubic" - Kubisk flatesentrert
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
HAZ	Heat Affected Zone - Varmepåvirket sone av sveis.
HV	Vickers Hardhet
IIW	International Institute of Welding
M	Martensitt. Omfatter martensitt og nedre bainitt
NDT	Non-destructive testing
P	Perlitt
Pcm	Ito – Besseyo karbonekvivalent
SEM	Scanning Electron Microscope
SP	Sideplateferritt som omfatter Widmanstätten ferritt og øvre bainitt
SSC	Sulphur Stress Cracking - H ₂ S-sprekking
TTT	Time, Temperature, Transformation
WPQ	Welding Procedure Qualification - Kvalifisering av sveiseprosedyre
WPS	Welding Procedure Specification - Sveiseprosedyre

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Eldre installasjoner på norsk sokkel har, i stort omfang, vært utbygd med karbonstål i rørsystemer over havoverflaten. Denne tidligere materialvalgfilosofi var basert på de amerikanske oljeselskapenes erfaringer fra Mexico-gulven samt at korrosiviteten på norsk sokkel var ansett som lav.

Etter mange års drift har produksjonsprofilen ofte endret seg fra primært produksjon av olje til mer og mer produsert vann som følge av mange års vanninjeksjon. Produsertvann inneholder CO₂ og er korrosivt. En har hatt betydelige korrosjonsproblemer på flere installasjoner på norsk sokkel og det har vært iverksatt omfattende utskiftningsprogrammer hvor materialkvaliteten har blitt endret fra karbonstål til rustbestandig stål av typen 6Mo, 22Cr Dupleks og 25Cr Super Dupleks. Dette er rustbestandige typer stål som kjennetegnes ved kjemisk innhold av henholdsvis 6% Mo og 22 og 25% Cr. På flere installasjoner er det imidlertid fortsatt karbonstållinjer igjen som er utsatt for korrosjon. Korrosjonshemmer benyttes aktivt for å redusere korrosiviteten, men den har ofte begrenset innvirkning på spalter og tetteflater slik at en erfarer korrosjon på flenser og hubber. Ved slike korrosjonsskader brukes reparasjonssveising som en metode for korrigerende vedlikehold.

Denne oppgaven tar for seg hardhetsproblematikk i forbindelse med reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser av karbonstål, tilknyttet strømningsrør oppstrøms² for separator. Strømningsrør inneholder ofte produksjonsvæske med et ugunstig innhold av H₂S (kjent som «sur service»). H₂S kombinert med fritt vann kan føre til problemer med spenningskorrosjon knyttet til hydrogenopptak i materialet. I slike miljøer stilles det strenge krav til maksimal hardhet både i grunnmaterialet og sveiseforbindelsen. Disse krav til maksimal hardhet i sveiseområdet er satt for å redusere muligheten utvikling av H₂S-sprekker ved inntrengning av hydrogen i sveiseflaten eller HAZ, noe som kan oppstå når hydrogenet diffunderer inn i en mikrostruktur med for høy gitterspenning. Hardhetskontroll er en godkjent praksis som er brukt for å unngå slike sprekker på sveisereparerte tetteflater i karbonstål.

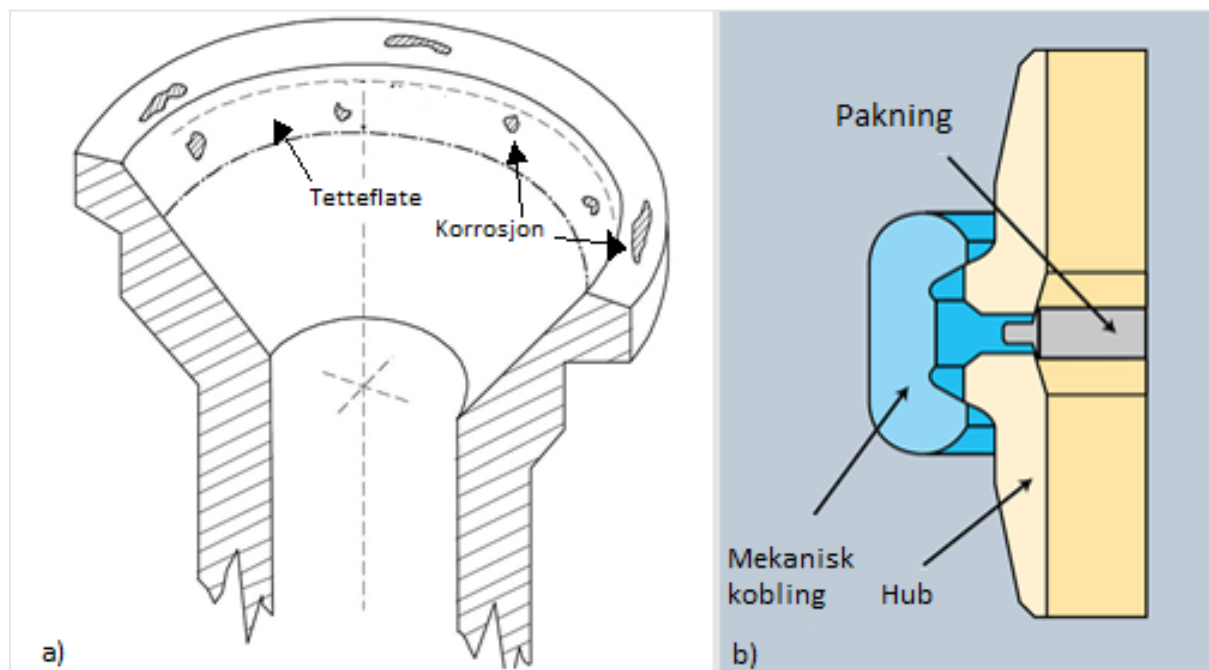


Figur 1.1: Bilde som illustrerer hvordan to hubber monteres sammen ved hjelp av en pakning og mekanisk kobling.

² Fra brønn til første separasjonstrinn

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

En hub kan sammenlignes med en flens, men istedenfor at den er boltet sammen holdes flatene sammen av mekanisk kobling. Figur 1.1 viser to hubber og hvordan disse holdes festet sammen ved hjelp av en mekanisk kobling. Figur 1.2 a) viser en skisse over et hub-tverrsnitt og tetteflate med typiske steder for korrosjonsangrep. Det er en slik korrodert tetteflate som ofte repareres ved påleggssveising og påfølgende maskinering, slik at man gjenetablerer en ny tetteflate uten skader. Figur 1.2 b) viser et utsnitt av to sammenkoblede hubber med en indentifisering av de forskjellige deler man finner ved en slik kobling. (Oceaneering, 2012)



Figur 1.2: a) Tverrsnitt av en hub med korrodert tetteflate, b) to hubber med mekanisk kobling og pakning.

1.2 Introduksjon til arbeidet med problemstillingen

På bakgrunn av problemer nevnt i kapittel 1.1 har følgende problemstilling blitt definert:

I forbindelse med reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål, hvilke sveisetekniske parametere har størst innflytelse når målet er å tilfredsstille krav til hardhet i sveiseområdet?

I forbindelse med sveisereparasjon av tetteflater har kontraktør benyttet en sveiseprosedyre som har vist seg å ha manglede kvalifikasjonsunderlag. På bakgrunn av dette har det vært satt i gang omfattende testing av denne prosedyren og resultatene har vist at krav til maksimal hardhet ikke tilfredstilles.

Med det mål for øyet å utvikle en ny og bedre sveiseprosedyre, har kontraktør og operatør gått gjennom flere runder med nye testinger i forbindelse med kvalifisering av en ny og forbedret sveiseprosedyre. Disse omtales under kapittel 3. I denne oppgaven har materialrester fra testing på Exova blitt utlevert for ytterligere undersøkelser av hardhet og mikrostruktur. Exova er et uavhengig testsenter som hyppig brukes av både kontraktør og operatør. Materialene det henvises til er en reparasjonssveiset blindhub fra en installasjon i Nordsjøen samt et påleggssveiset rør og en påleggssveiset stang fra prosedyretesting, henholdsvis tilknyttet testserie 1, 2 og 3a.

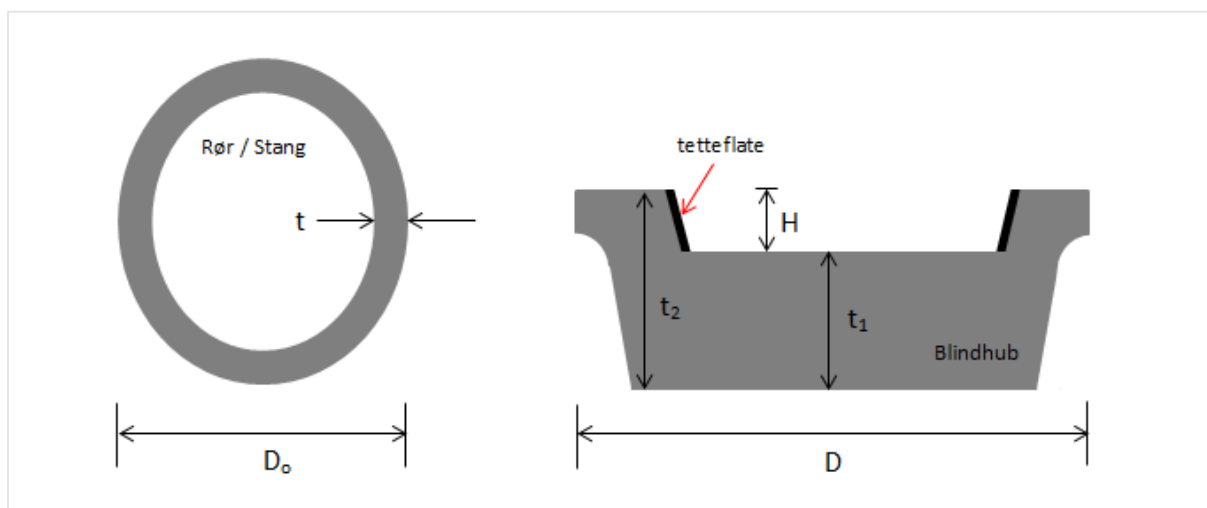
Det var ut ifra en mistanke hos operatør, at denne sveiseprosedyren gjennomgikk en produksjonstesting for å få riktig kvalifiseringsunderlag, eller forkaste prosedyren hvis den feilet i forhold til hardhetskravene. Prosedyretesten på rør (testserie 2) viste at prosedyren førte til for høy hardhet i sveisemetallet. Dette startet en prosess der en tidligere reparasjonssveiset blindhub ble hentet onshore for å sjekke hardhet og kjemi av sveiseforbindelsen og grunnmateriale (testserie 1). Da det ble verifisert at sveiseprosedyren ikke møtte krav til maks hardhet, ble prosessen med å utvikle en ny og forbedret prosedyre satt i gang. På et rør av normalisert karbonstål ble det testet med flere sveisemetoder og med litt forskjeller i kjemi og andre sveisetekniske parametere. Etter forslag fra operatør ble grunnmaterialet endret til et stangmateriale, som har noe høyere karboninnhold enn røret. Kjemien i sveisetilsettet ble også endret samt en økning av arbeidstemperatur fra 100 til 200 °C samt en liten økning av varmetilførselen. Dette resulterte i en ny sveiseprosedyre (testserie 3), som kun hadde noen få målinger som ikke tilfredstilte krav til maks hardhet. Denne ble da godkjent som ny sveiseprosedyre for dette formål. Målet videre er å utvikle en sveiseprosedyre, som uten problemer holder seg innenfor de gitte hardhetskrav. Dette er utgangspunktet for tidligere nevnte problemstilling.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Som et bidrag til å finne et svar på oppgavens problemstilling har operatør og kontraktør bidratt med sveisedokumentasjon, materialer fra testing på Exova sammen med testsertifikater samt annen relevant informasjon. Materialene var en reparasjonssveiset blindhub samt materialer etter prosedyretesting på rør og stang.

Geometri for materialene er illustrert i Figur 1.3, mens tilhørende dimensjoner er listet opp under:

- Blindhub med reparasjonssveiset tetteflate
 - $D = 250$ mm
 - $t_1 = 64$ mm
 - $t_2 = 91$ mm
 - $H = 28$ mm
- Sømløst rør brukt for prosedyretesting (påleggssveising utenpå rørfaten)
 - $D_o = 323,5$ mm
 - $t = 25,4$ mm
- En (uthulet) stang brukt for prosedyretesting
 - $D_o = 280$ mm
 - $t = 26$ mm



Figur 1.3: Illustrasjon som viser geometrisk form for rør, stang og blindhub

Materialene er alle sveiset med to-lags påleggssveis og samme sveisemetode (TIG), men med ulikt kjemisk innhold i grunnmateriale og sveisetilsett. Videre i oppgaven presenteres disse materialene som *blindhub*, *rør og stang*. Kapittel 3 presenterer hardhetsmålinger utført ved tidligere testinger, hovedsakelig av testsenteret Exova. Materialene har da gjennomgått testing av hardhet etter standardiserte metoder ved bruk av Vickers metode for hardhetsmåling. Hardhetsmålingene er presentert på en enkel måte ved hjelp av en grafisk fremstilling av hardhetsverdiene. Tabeller med utfyllende data tilknyttet diagrammene er plassert i vedlegg. I tillegg til de nevnte testmaterialene er også de forskjellige sveisetilsettene presentert i samme kapittel, og disse betegnes som tilsett A og B.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Blindhub, rør og stang har i denne oppgaven blitt testet med Vickers metode for mikrohardhetsmåling. Dette ble gjort for å gå mer lokalt inn i mikrostrukturen og kartlegge hardhetsdistribusjonen i påvist problemutsatte områder, samt for å koble målt hardhet opp i mot observert mikrostruktur. For visuell vurdering av mikrostruktur har metallmikroskop blitt brukt hyppig. Det har blitt beregnet teoretiske hardhetsverdier for sammenligning med tidligere hardhetstesting utført av Exova samt med resultater fra denne oppgaven. Avkjølingshastigheten for sveising med de forskjellige sveisetilsett kjemiene er også blitt beregnet. I tillegg har utvalgte makroer fra blindhub og rør blitt spenningsglødet for å undersøke hvilken grad av reduksjon i hardheten dette gir. Som et supplement til resultatene fra tidligere og egen testing, og dermed å gi et bedre underlag for sammenligning av parametere, har kontraktør sveiset opp nye materialer til arbeidet med denne oppgaven. Disse nye materialene ble sveiset basert på prosedyre fra rør og stang (testserie 2 og 3a), men med endring av utvalgte parametere. Dessverre ble materialene levert mot slutten av arbeidet med denne masteroppgaven, og de ble derfor testet av Exova slik at resultatene fra hardhetstesting ble tilgjengelige tidsnok til å tas med i vurderingen. Resultater fra egen testing av blindhub, rør og stang samt resultatene fra denne nye testingen på Exova, er presentert i kapittel 5.

En konklusjon er tatt på bakgrunn av en totalvurdering av resultater fra tidligere testing på Exova samt egne resultater utarbeidet ved eksperimentelt og teoretisk arbeid.

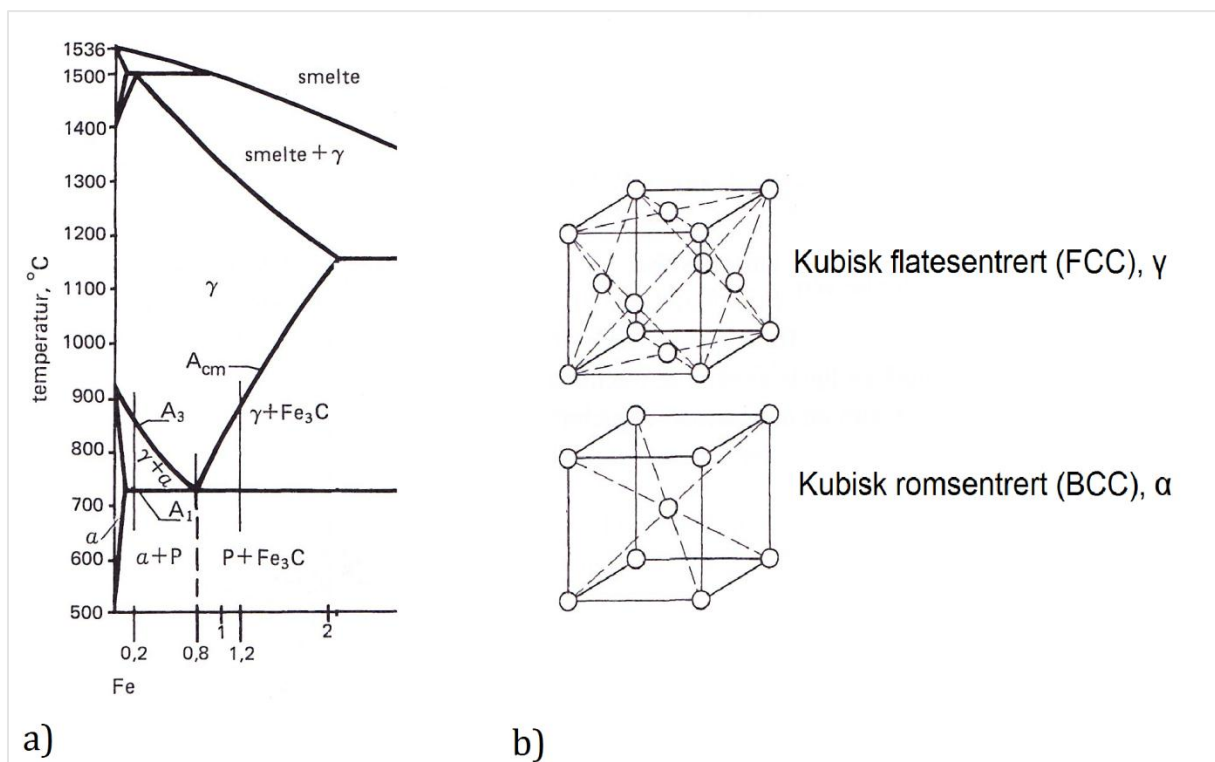
2 Teori

2.1 Jern-karbon legering (Fe-C)

Legeringsystemet, der jern og karbon er hovedkomponenter, byr på mange nyttige reaksjoner og mikrostrukturer. Årsaken til denne flersidigheten er bestemte egenskaper hos Fe- og C-atomene:

- Jern opptrer med to forskjellige gitterstrukturer i fast tilstand (se Figur 2.1b))
 - Austenitt (γ) som er kubisk flatesentrert (FCC)
 - Ferritt (α) som er kubisk romsentrert (BCC)
- Karbonet kan gå inn i interstitielle posisjoner i γ -strukturen, men i liten grad i α -strukturen.
- Utfelling av karbonfasen i α -ferritt kan undertrykkes helt eller delvis. Dette skyldes at løseligheten av karbon i α -fasen er vesentlig mindre enn i γ -fasen, samt at diffusjonshastigheten av karbon har en gunstig størrelse i begge faser.

(Almar-Næss, 2003)



Figur 2.1: a) Fe-C-fasediagram for stål (P: perlitt, Fe_3C : sementitt), b) kubisk flatesentrert og kubisk romsentrert gitterstruktur. (Almar-Næss, 2003)

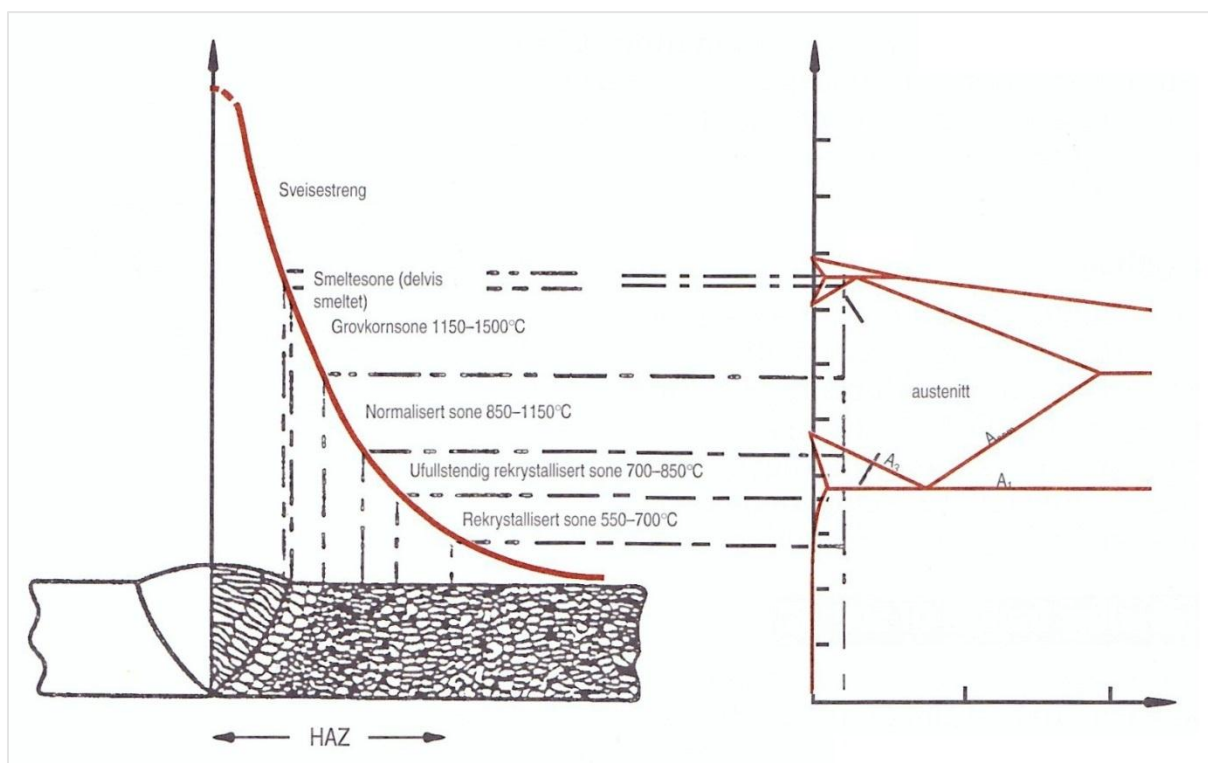
Stål er en Fe-C-legering begrenset oppad til 2 % karbon. Figur 2.1 a) viser et Fe-C fasediagram for stål, og dens gitterstruktur ved forskjellige temperaturer. (Almar-Næss, 2003)

2.1.1 Korrosjon av karbon- og lavlegerte stål

Karbonstål korroderer i de fleste atmosfæriske miljøer der den relative fuktigheten overstiger 60 %. Med en gang en fuktighetsfilm dannes på overflaten vil overflaten begynne å korrodere. Korrosjonsraten er avhengig av flere faktorer. De viktigste faktorene er tilgang på oksygen, lav pH og nærvær av aggressive ioner, spesielt oksyder av svovel og klorider. I strømningsrør av karbonstål som fører H₂S-holdige produksjonsvæsker sammen med produsert vann, kan korrosjonsraten være uforutsigbar. Dette kan føre til en form for spenningskorrosjon der hydrogen spiller en viktig rolle. H₂S fører til surt miljø i strømningsrørene, derav navnet sur service. (Trethewey & Chamberlain, 1995)

2.2 Sveisemetallurgi

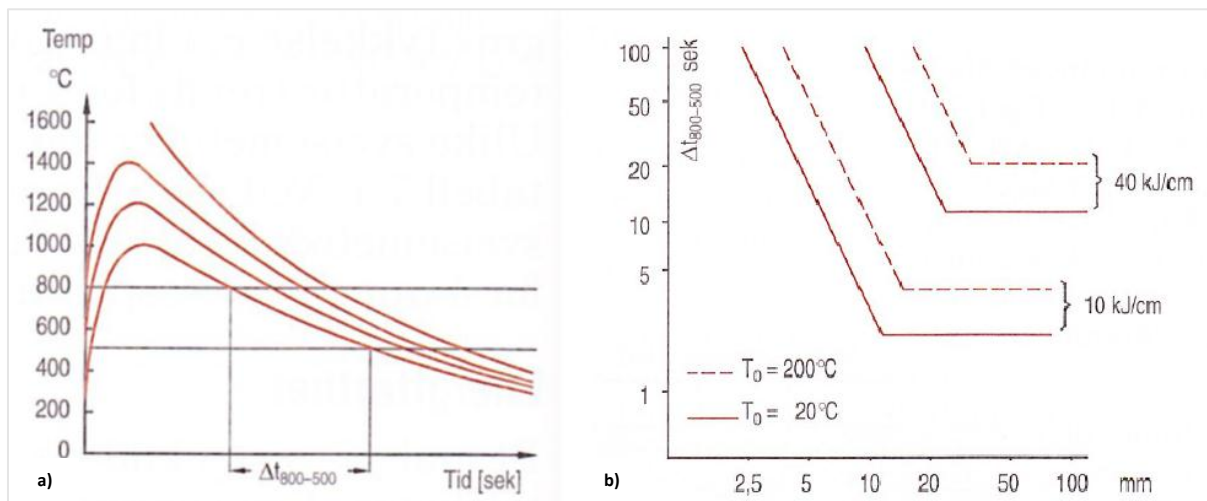
Sveising berører mange metallurgiske områder som smelting, størkning, reaksjoner mellom dekk-gass og smelte samt reaksjoner mellom slagg og metall. I tillegg forekommer det omvandlinger i fast fase samt varme- og krympespenninger. Sveisemetallurgien skiller seg fra vanlig metallurgi på flere områder. Materialfysiske prosesser som inngår i materialet ved sveising er rask oppvarming og avkjøling samt strukturforandringer som påvirker fasthet, seighet og korrosjonsbestandighet. Ved sveising oppstår det en sjokkvarmebehandling der materialet varmes raskt opp til høye temperaturer og avkjøles raskt grunnet metallens gode varmeledningsevne. Figur 2.2 viser temperaturdistribusjonen knyttet til et fasediagram for en sveiseforbindelse. (Mattson & Hammer, 2001)



Figur 2.2: Skisse av en sveiseforbindelse med ulike temperatursoner ved sveising. (Mattson & Hammer, 2001)

2.2.1 Avkjølingshastighet

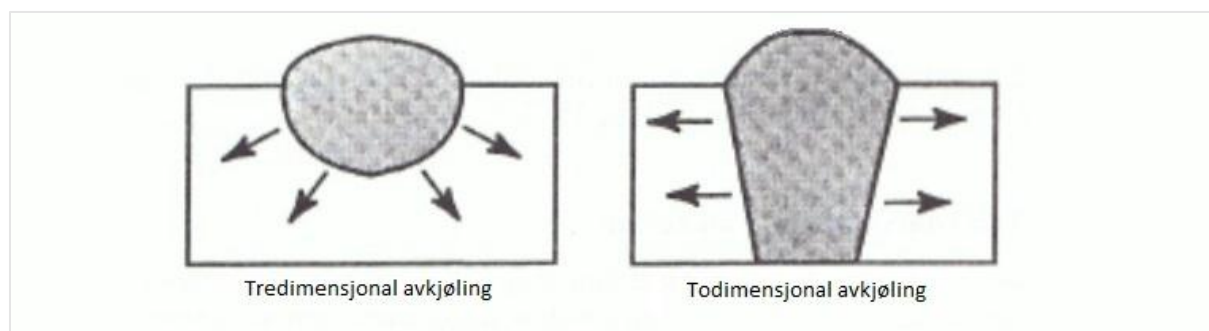
Sveising innebærer en varmebehandling av grunnmaterialet rundt sveisen og temperaturfordelingen er avhengig av materialets varmeledningsevne. Ved sveising er det viktig å kjenne til avkjølingshastigheten. For å bedømme herdingsrisikoen for stål er avkjølingstiden mellom 800 °C og 500 °C en viktig faktor (betegnes som $\Delta t_{8/5}$ og oppgis i sekunder). Figur 2.3 a) viser dette temperaturforløpet ved sveising på ulike avstander fra sveisesentrum. (Mattson & Hammer, 2001)



Figur 2.3: a) Kurvene viser temperaturforløpet i materialet under sveising, ved ulike avstander fra sveisemidten. Den øverste kurven representerer temperaturforløpet i sveisemidten, og de andre kurvene i økende avstand fra smeltebad. Definisjon av $\Delta t_{8/5}$ er tiden det tar for avkjøling av materialet, fra 800 til 500 °C. Dette tallet er tilnærmet konstant fra sveisemidten og til en viss avstand fra sveisemidten. Kurvene i diagram b) viser avkjølingshastigheten, ($\Delta t_{8/5}$), som funksjon av godstykkelsen ved ulik varmetilførsel og arbeidstemperatur. Merk overgangen fra to- til tredimensjonal varmeledning. (Mattson & Hammer, 2001)

Avkjølingshastigheten etter sveising er avhengig av stålets varmeledningsevne, tetthet, spesifikke varme samt materialdimensjon, varmetilførsel og arbeidstemperatur. Figur 2.3 b) viser avkjølingshastigheten som funksjon av godstykkelse ved forskjellig arbeidstemperatur og varmetilførsel. Man kan også observere overgangen fra todimensjonal til tredimensjonal varmetilførsel (se skisse i Figur 2.4). Over en viss godstykkelse, er ikke avkjølingshastigheten lenger avhengig av tykkelsen. Man får da en avkjølingshastighet, mellom 800 og 500 °C, som kun er avhengig av tilført varme eller arbeidstemperaturen (T_0).

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 2.4: Skisse som illustrerer prinsippet for tre- og todimensjonal varmeledning i grunnmaterialet.

Som vist i Figur 2.4 deles avkjølingsforløpet etter sveising inn i to- og tredimensjonal varmeledning. For beregning av avkjølingshastigheten $\Delta t_{8/5}$ har vi to formler:

Todimensjonal avkjøling:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot \rho \cdot t^2} \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right]$$

Tredimensjonal avkjøling:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_0)} - \frac{1}{(800 - T_0)} \right]$$

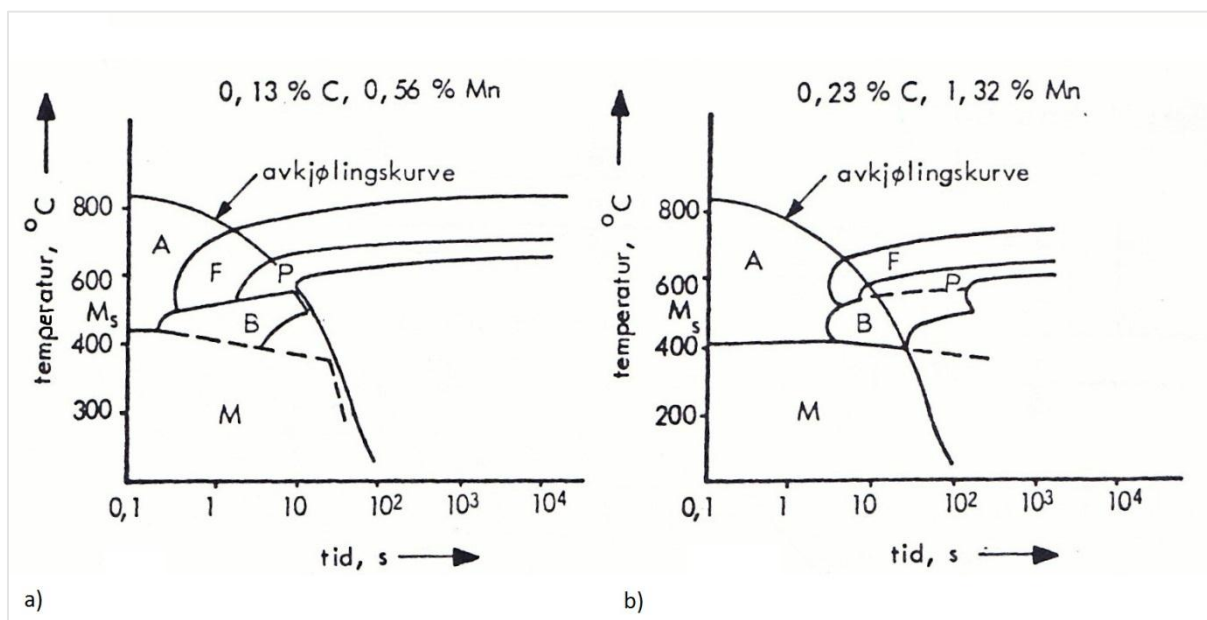
λ : varmeledningsevne
 ρ : tetthet
 c_p : spesifikk varme
 t : godstykkelse
 Q : varmetilførsel
 T_0 : arbeidstemperatur
(Mattson & Hammer, 2001)

Merk at ved tredimensjonalt avkjølingsforløp, er ikke avkjølingshastigheten avhengig av godstykkelse.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Dersom man kjenner til avkjølingsforløpet i sveiseforbindelsen, kan man til en viss grad kunne forutse distribusjonen av mikrostruktur. Et CCT-diagram (continuous cooling transformation) er bygget på omvandlingens avhengighet til avkjølingshastigheten. Til sammenligning er et Temperatur-, Tid- og Transformasjon-diagram (TTT) bygget opp ved konstant temperatur. (Mattson & Hammer, 2001)

Figur 2.5 under viser et CCT-diagram med samme avkjølingsforløp, fra austenitt-området (A), for to forskjellige jern-karbon-legeringer. Man kan se av diagrammene at ved økende legeringsgrad, vil områdene for dannelse av ferritt (F), perlitt (P) og bainitt (B) flytte seg mot høyre i diagrammet. Disse avrundede områdene kalles også for «nesen» i diagrammet. Med økende grad av legeringsinnhold, vil man trenge en lavere avkjølingshastighet for å unngå sprø strukturdanninger som martensitt (M). I kapittel 2.2.3 forklares det mer om hvilken mikrostruktur man kan forvente å finne i sveiseavsettet.

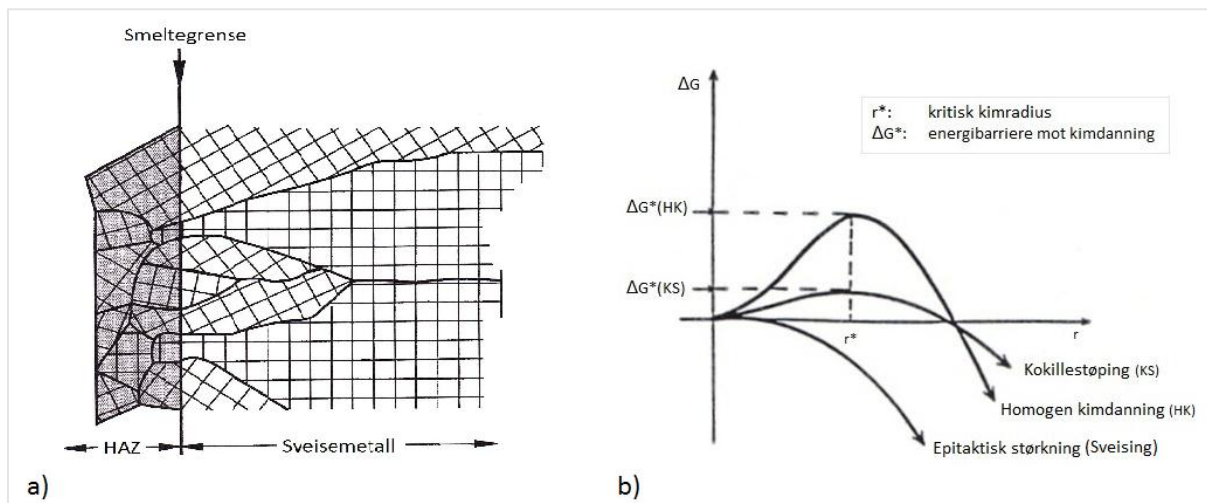


Figur 2.5: CCT-diagram for to forskjellige Fe-C legeringer. Legering a) vil få en mikrostruktur bestående av ferritt og perlitt, mens legering b) vil ende opp med i hovedsak bainitt og martensitt. (Halmøy, 2007)

Som vist tidligere, i Figur 2.2, har en sveiseforbindelse flere temperatursoner knyttet til type mikrostruktur man vil ende opp med, også avhengig av karboninnholdet. Man vil i tillegg få en oppblending av grunnmateriale og sveisetilsett noe som vil føre til forskjeller i kjemisk sammensetning på tvers av sveisesonen. Det vil derfor være nødvendig med opptil flere CCT-diagrammer for å kunne forutse endelig sammensetning av mikrostruktur.

2.2.2 Størkning av sveisemetall

Ved størkning av sveisemetall vil heterogen kimdanning starte ved smeltegrensen til de tilstedeværende krystallkornene i HAZ. De eksisterende kornene i HAZ tjenestegjør som kimdanningssteder for nye, voksende søylekrystaller. Det vil ikke finnes noen skarp smeltegrense på atomnivå fordi kimdanningen starter på allerede tilstedeværende krystaller. Denne type størkning kalles epitaktisk kimdanning og kan observeres på Figur 2.6 a) under. (Mattson & Hammer, 2001)

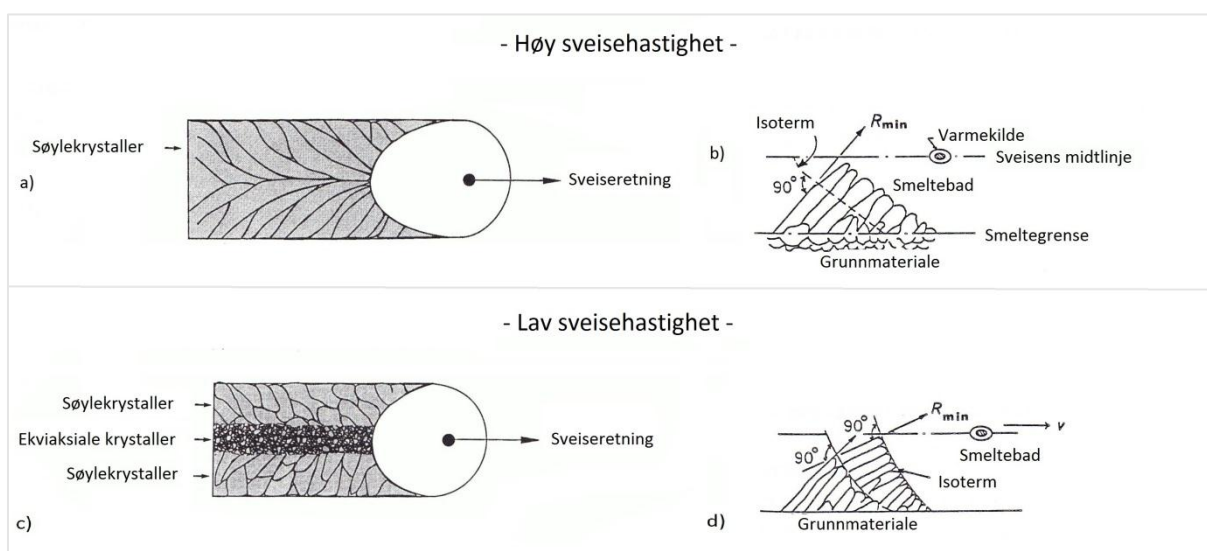


Figur 2.6: a) Illustrasjon av epitaktisk vekst av søylekrystaller som startet på smeltegrensen, som er overgangen fra varmepåvirket sone til sveisemetall. Samt b), som viser energibarrieren mot kimdanning for tre ulike størkningsforløp. (Mattson & Hammer, 2001)

Ved epitaktisk størkning er energibarrieren mot kimdanning tilnærmet lik null, dette betyr at krystallisering av sveisemetall kan foregå ved svært små underkjølinger. Med underkjøling menes faseovergang som foregår ved temperaturer lavere enn likevektstemperaturen. Det vil alltid kreves en viss grad av underkjøling for å danne nye kim. Nye kim er ustabile opp til en viss kimradius. Under denne kritiske kimradiusen vil kimet ikke utvikle seg videre til krystall, men skrumpe inn. Dette er knyttet direkte til energibarrieren. Ved stor energibarriere, må det større underkjølinger til for at kim skal bli stabile nok til å danne krystaller som igjen utvikler seg videre til korn av en viss krystallstruktur. Figur 2.6 b) viser energibarrieren for kimdanning ved epitaktisk størkning, homogen kimdanning og ved kokillestøping. Man ser at energibarrieren er ulik ved forskjellige størkningsforløp. Ved epitaktisk størkning vil nydannede kim nesten umiddelbart bli stabile nok til å utvikle seg videre til søylekrystaller. (Almar-Næss, 2003)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Vekstretningen for søylekrystaller foregår parallelt med maksimal temperaturgradient (R_{min}) i smelten, som vil si normalt på isoterme flater. Figur 2.7 viser at størknestrukturen er påvirket av smeltebadets geometriske form, som igjen er avhengig av sveiseparametere og grunnmaterialets varmeledningsevne. Retning på den maksimale temperaturgradienten i smeltebadet vil kunne endres under størkningsforløpet, avhengig av sveisehastighet eller grunnmaterialets varmeledningsevne. Figur 2.7 a) viser et smeltebad som på grunn av høy sveisehastighet eller lav varmeledningsevne i grunnmaterialet har blitt dråpeformet. Dette fører til at maksimal temperaturgradient vil variere relativt lite langs smeltebadets ytterkant. Bilde b) viser at søylekrystallene da kan vokse fra kanten av smeltebadet og helt inn til senterlinjen av sveisen uten å skifte retning. På Figur 2.7 c) kan vi se et mer elliptisk smeltebad, som skyldes lav sveisehastighet eller høy varmeledningsevne i materialet. Ved slike forhold vil man få en maksimal temperaturgradient som varierer kontinuerlig langs ytterkanten av smeltebadet. Dette fører til at de voksende krystallene må re-kimdannes, og endrer da vekstretning, frem til de når senterlinjen av sveisen. Dette vises tydelig på bilde d) (Grong, 1990)



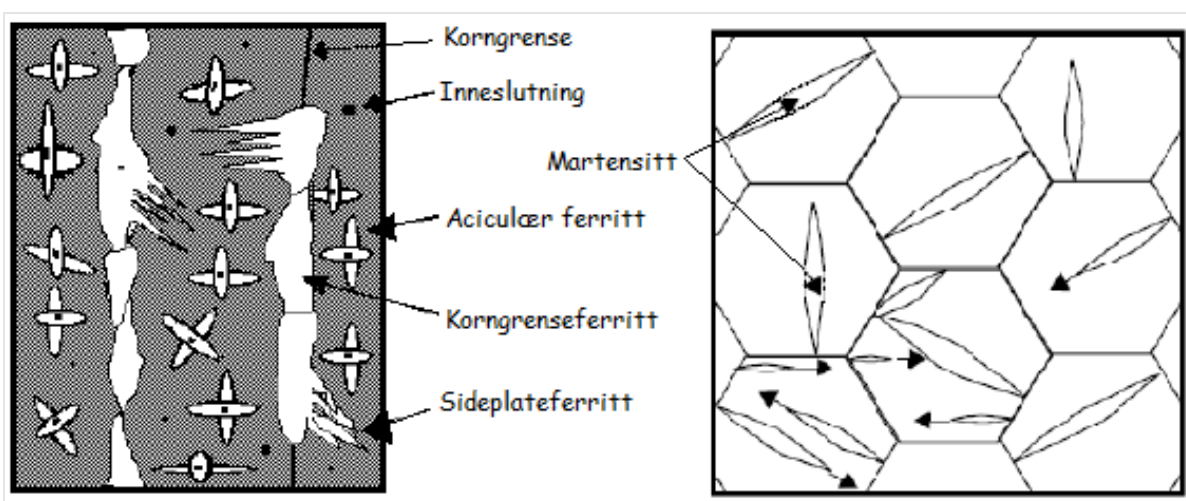
Figur 2.7: a) Illustrasjon som viser vekst av søylekrystaller ved høy sveisehastighet, som gir et dråpeformet smeltebad og b) vekst av søylekrystaller der maksimal temperaturgradient (R_{min}) varierer lite. Ved lav sveisehastighet får vi, c), elliptisk smeltebad med vekst av søylekrystaller og ekviaksiale krystaller, samt d) re-kimdanning på grunn av at maksimal temperaturgradient skifter retning kontinuerlig. (Grong, 1994) og (Porter & Easterling, 2000)

2.2.3 Mikrostruktur i sveisemetall

Det kan oppstå mange forskjellige typer mikrostruktur i det samme sveisemetallet. Dette skyldes at ulike deler av sveisemetallet får forskjellig avkjølingshastighet. Ved flerlagsveising vil man få en varmebehandling av tilgrensende mikrostruktur. (Halmøy, 2007).

Mikrostrukturer i stål deles ofte inn i fem strukturkomponenter. Den følgende listen er rangert med økende hardhet (Grong, 1990):

- F:** Ferritt. Omfatter både korngrenseferritt og ekviakset ferritt.
- P:** Perlitt. Separate kolonier man vanligvis kun finner i grunnmaterialet, men som kan oppstå i finkornet HAZ ved svært langsom avkjøling.
- AF:** Aciculær ferritt er separate ferrittnåler som er heterogent kimdannet på partikler.
- SP:** Sideplateferritt som omfatter både widmanstättenferritt og øvre bainitt.
- M:** Martensitt. Omfatter også nedre bainitt.



Figur 2.8: Bildet viser mikrostruktur bestående av aciculær ferritt, korngrenseferritt, sideplateferritt og martensitt, samt inneslutninger. (H. K. D. H. Bhadeshia, 2000)

2.2.3.1 Ferritt (F)

Korngrenseferritt opptrer ofte i finkornet HAZ og sveisemetall. Kimdanning foregår vanligvis på kornhjørner og langs korngrenser og er som oftest et utfall av langsom avkjøling og liten austenittkornstørrelse. Denne mikrostrukturen er vanligvis ansett som uønsket, da den er ugunstig med hensyn på seighet. (Grong, 1990)

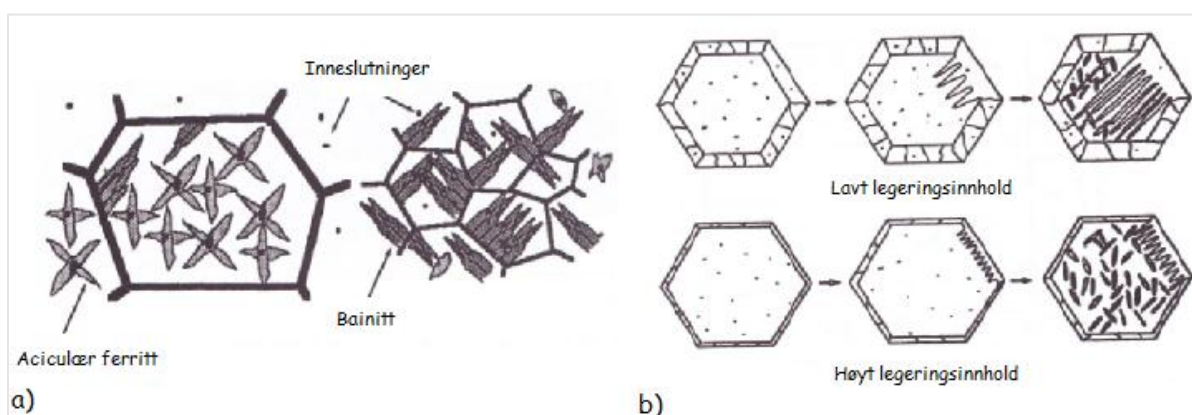
2.2.3.2 Perlitt (P)

Består av en lamellstruktur av ferritt og cementitt (Fe_3C). Oppstår ved relativt langsom avkjøling og finnes som separate kolonier, vanligvis i grunnmaterialet eller finkornet HAZ. (Grong, 1990)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

2.2.3.3 Aciculær ferritt (AF)

Dannes ved økende grad av underkjøling. Mikrostrukturen kimdannes intragranulær på ikke-metalliske inneslutninger. Inneslutninger rike på titan har vist seg å være effektive kimdanningssteder. Lengde-til-bredde forholdet ligger vanligvis på 2:1 til 4:1 med en kornstørrelse på 1 til 3 μm . Kløyvingsmotstanden er som regel veldig god, grunnet kornstørrelse og hvordan nålene vokser i forhold til hverandre. Mikrostrukturen er svært ønskelig i sveisemetall, men er mer sjelden å finne i varmpåvirket sone som skyldes partikkeltettheten. Nåleferritten vokser uten diffusjon, men karbonet som blir til overs blir ikke fanget i den overmettede ferritten. Den blir fordelt i den resterende austenitten kort tid etter vekst. (Grong, 1990) (H. K. D. H. Bhadeshia & Honeycombe, 2006)



Figur 2.9: a) Dannelse av aciculær ferritt og øvre bainitt (sideplateferritt), b) dannelsen av aciculær ferritt og omvandlingens avhengighet av legeringsinnhold. (H. K. D. H. Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

Figur 2.9 a) og b) viser at dannelse av aciculær ferritt er påvirket av flere faktorer. Austenittkornstørrelsen bør være stor nok, som vil hemme omvandling på korn grenser og fremme intragranulær kimdanning. Partikkelstørrelse og -tetthet spiller også en stor rolle. Partiklene må være av en viss størrelse for at de skal virke som effektive kimdanningspunkter samt at partikkeltettheten må være stor nok for å hemme kornveksten. Dette vil bidra til at vi får en fin og gunstig kornstørrelse med hensyn på de mekaniske egenskapene. Til sist spiller kjemisk sammensetning en viktig rolle. Stålet må inneholde en viss mengde herdbarhets-elementer (Mn, Ni, Mo, Cr eller B) som kan bidra til å undertrykke transformasjonen på korn grensene. Siden heterogen kimdanning på korn grenser er energimessig mer gunstig enn heterogen kimdanning på intragranulære partikler, tilsettes legeringselementene slik at de seigrer til korn grensene og dermed senker korn grense energien. Dette vil da favorisere dannelse av aciculær ferritt (Grong, 1990). Dersom disse betingelsene ikke er tilfredsstillt vil øvre bainitt dannes. Dette kan observeres på Figur 2.9 b). (H. K. D. H. Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

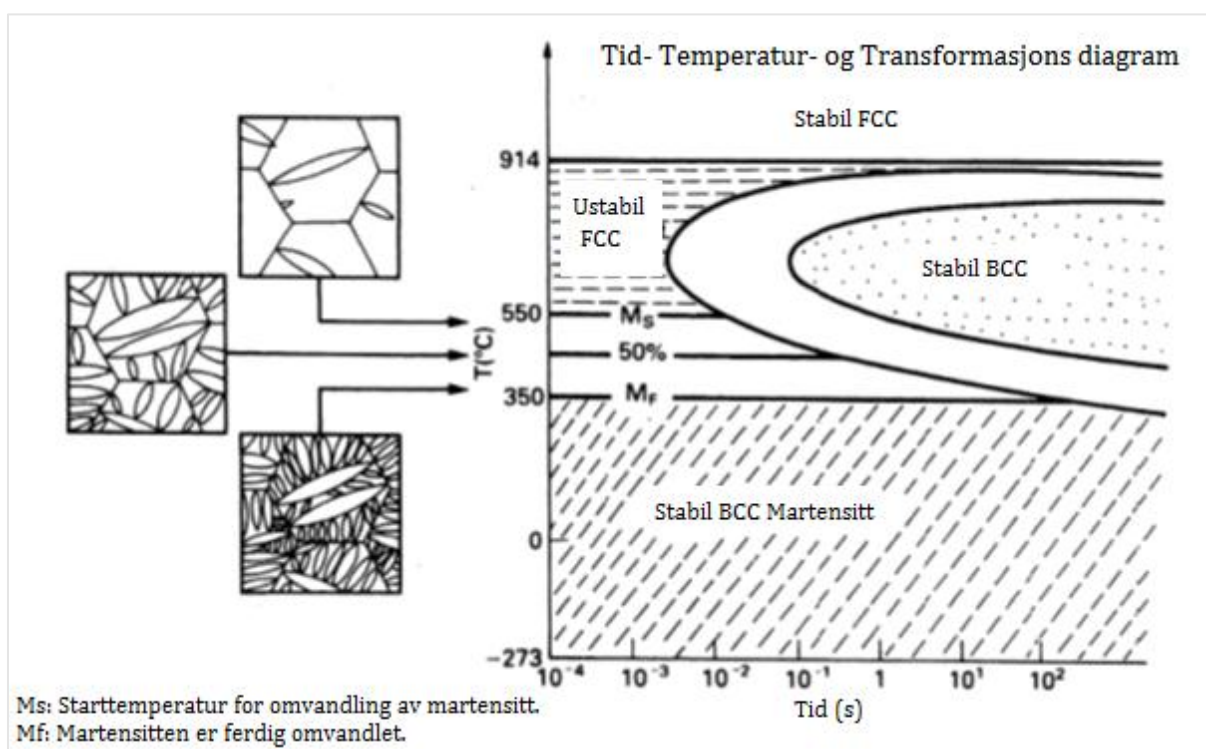
Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

2.2.3.4 Sideplateferritt (SP)

Grunnet vanskeligheter ved å skille widmanstättenferritt og øvre bainitt fra hverandre i optisk lysmikroskop, har de fått fellesbetegnelsen sideplateferritt. Sideplateferritt finner man hovedsakelig i grovkornet HAZ, men også i sveisemetall. Den dannes fra begynnende korn grenseferritt der underkjølingen blir så stor at diffusjonen av karbonatomer ikke foregår hurtig nok for å opprettholde en plan vekstfront. Resultatet blir parallelle nåler som vokser langs foretrukne krystallografiske plan. På grunn av høy temperatur og en overmettet ferritt, diffunderer karbonet til austenitten mellom nålene. Lengde-til-bredde forholdet ligger ofte rundt 10:1 til 20:1. De mekaniske egenskapene for denne mikrostrukturen er normalt ganske dårlige. Dette skyldes dannelse av sprø mikrofaser, som perlit, karbider og martensitt, mellom platene. (Grong, 1990)

2.2.3.5 Martensitt (M)

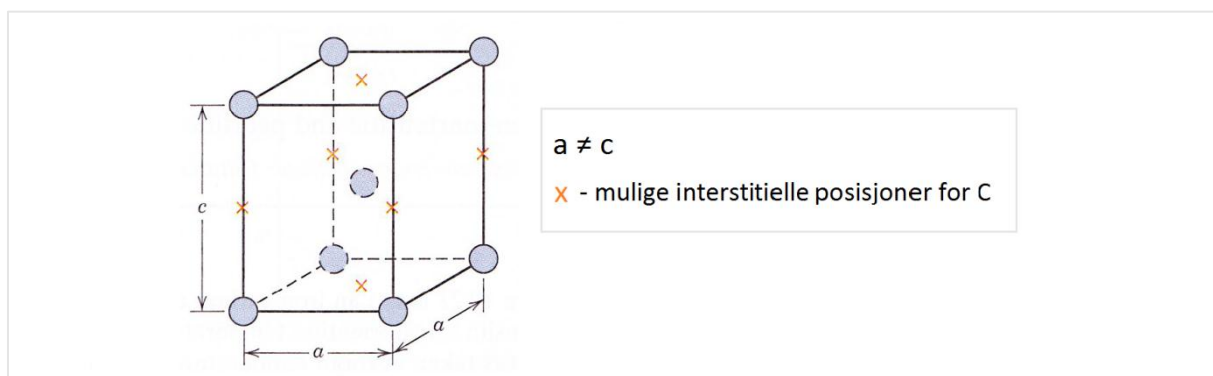
Martensitt dannes ved rask avkjøling og omvandlingen er diffusjonsuavhengig. Det er en hard og sterk, men sprø, mikrostruktur der hardheten kun er avhengig av karboninnholdet. De mekaniske egenskapene til martensitt er allikevel ikke avhengig av mikrostrukturen, men av de interstitielle karbonatomenes evne til å hindre dislokasjonsbevegelse. Martensitten har derfor ofte høy tetthet av dislokasjoner. Nedre bainitt er ofte vanskelig å skille fra martensitt i optisk lysmikroskop, og de har derfor fellesbetegnelsen martensitt i denne sammenheng. (Callister & Rethwisch, 2007)



Figur 2.10: TTT-diagram som viser avkjølingsområdet for omvandling av martensitt. (Johnsen, 2009)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Som nevnt i kapittel 2.1 er løseligheten av karbon mye større i austenitt (γ) enn i ferritt (α). Dette skyldes bedre plass til interstitielle atomer i gitterstrukturen FCC enn BCC. På grunn av mangel på diffusjon vil det med en rask avkjøling til romtemperatur dannes en overmettet løsning av karbon i α -fasen, der karbonatomene legger seg interstitielt i BCC-gitteret. Gitterstrukturen for martensitt blir da en romsentrert tetragonal struktur (BCT), som ligner en deformert BCC-struktur. Figur 2.10 over viser et TTT-diagram for omvandling til martensitt i vanlig stål. Ved tilstrekkelig rask avkjøling vil man unngå «nesen» i diagrammet hvor diffusjonskontrollert omvandling starter. Hvis vi har avkjøling fra området med ustabil FCC-struktur (austenitt) til over linjen M_s (starttemperaturen for omvandling av martensitt) vil det dannes plater av martensitt umiddelbart inne i austenittkornene. Karbonatomene blir da fanget i det som normalt skulle vært et BCC-gitter, men som blir deformert på grunn av plassmangel og går over til BCT-gitter. (Almar-Næss, 2003) Figur 2.11 under viser BCT-gitterstrukturen med mulige interstitielle posisjoner for karbon.



Figur 2.11: Skisse for en rom-sentrert tetragonal struktur (BCT), som martensitt foreligger som. Den er tilnærmet lik BCC, bortsett fra at sidene a og c ikke er like lange. Denne forskjellen i lengde er allikevel svært liten. Karbonatomene kan foreligge på de interstitielle posisjonene markert med x . (Callister & Rethwisch, 2007)

2.3 Herdemekanismer i stål

Legeringselementene man finner i stål tar plass i strukturen på ulike måter. Vi kan ha løsningsherding, utskillingsherding, elding og kaldbearbeiding. For stål benyttes også uttrykket herding for martensittherding, som vil si oppvarming til en temperatur over A_1 med påfølgende bråkjøling for danning av herdestrukturen martensitt. (Mattson & Hammer, 2001)

Ved løsningsherding blir fast løsning opprettholdt, mens fremmede atomer legeres inn i metallet. Atomene varierer i størrelse som fører til en innblanding med materialer på ulike måter. Herdemekanismen løsningsherding kan deles opp i to grupper (Mattson & Hammer, 2001):

- **Substitusjonell løsning:** de løste atomene erstatter atomene i grunnmetallet på ordinære gitterposisjoner. Forskjell i atomstørrelsen kan være $\pm 15\%$. Størrelsesforskjellen skaper et spenningsfelt som bremser passerende dislokasjoner. Dette øker fastheten litt. Eksempler på substitusjonelle legeringselementer i jern er mangan, kobber, molybden.
- **Interstitiell løsning:** De mindre løste atomene legger seg i gitterets mellomrom, noe som har større effekt på fastheten enn ved substitusjonell plassering. Forskjellen i størrelse mellom legeringselementene og de ledige mellomromsplassene er ofte stor. Eksempler på slike legeringselementer i jern, er nitrogen, karbon og hydrogen.

Utskillingsherding er danningen av en annen fase i grunnmetallet i form av svært små partikler. Disse partiklene oppstår ved at materialet varmes opp til en temperatur som gir en en-fasetilstand og deretter kjøles ned. Ved avkjøling til romtemperatur dannes partiklene på nytt og de kan vokse med etterfølgende elding. De utskilte partiklene utgjør et hinder i glideplanene for dislokasjoner. (Mattson & Hammer, 2001)

Når de utskilte partiklene i et metall vokser, kalles det elding og denne typen herdemekanisme kan deles inn i to grupper, kaldelding og varmelding. Hvis utskillingsforløpet foregår ved romtemperatur, kalles det kaldelding. Dersom eldingen skjer ved økt temperatur snakker vi om varmelding. Varmelding gir høyere fasthet enn kaldelding. (Mattson & Hammer, 2001)

Ved kaldbearbeiding menes tilvirkning av legeringer ved kaldvalsing, smiing eller kaldtrekking. Denne kaldbearbeidingen gir en fin og jevn overflate og for visse metaller gir den også økt fasthet, dette kalles også deformasjonsharding. Materialets struktur blir presset sammen og krystallkornene går fra å være ekviaksede til å bli lange og smale samt at mikrostrukturen får mer båndstruktur. (Mattson & Hammer, 2001)

2.4 Legeringselementers påvirkning av mekaniske egenskaper til stål

Legeringselementer kan være tilsatt tilsiktet eller utilsiktet.

- Tilsiktede elementer for stål kan for eksempel være karbon, silisium, mangan, krom, nikkel og molybden. Disse tilsettes stålet for å gi stålet visse egenskaper. Mikrolegeringselementene aluminium, niob og vanadium tilsettes i svært små mengder, vanligvis rundt 0,01 – 0,2 %. Disse elementene påvirker stålets egenskaper sterkt gjennom finkorndanning og utskillingsherding. I tillegg kan deoksidasjonsstoffer tilsettes. Disse har som oppgave å binde det innløste oksygenet i stålet.
- Utilsiktede legeringselementer kan være restelementer på noen få tidels prosent av stoffer som krom, kopper og nikkel som utilsiktet har kommet inn i stålet. Selv ved lave konsentrasjoner kan disse elementene allikevel påvirke stålets egenskaper kraftig. Samtidig har vi forurensninger som fosfor, svovel, oksygen, nitrogen og hydrogen som anses skadelige for det ferdige stålet. I tillegg gir fosfor og svovel kraftige seigringer, som er anrikning av legeringselementer i bånd etter størkning. Innholdet av svovel bør ligge på mellom 0,005 % og 0,025 % da dette skyldes faren for størkningsprekker ved et høyere innhold og faren for hydrogensprekker ved et lavere innhold.

I forbindelse med TTT- og CCT-diagram, vil legeringselementene påvirke omvandlingen diagrammet med å flytte «nesen» mot høyre. Dette gjør at det kreves lavere avkjølingshastighet for å unngå martensitt. Dette kan vi også se av Figur 2.5 fra kapittel 2.2.1, der CCT-diagram for to jern med forskjellig legeringsinnhold er vist. Legeringselementene vil ligge oppløst i austenitten og har litt større størrelse enn Fe-atomene. Dette betyr at de vil diffundere langsommere og bruke lenger tid på å diffundere til nye substitusjonelle posisjoner. (Porter & Easterling, 2000)

Legeringselementer kan være enten austenittstabiliserende eller ferrittstabiliserende. Med dette menes at A_1 -temperaturen (se Figur 2.1) enten senkes (γ -stabiliserende) eller heves (α -stabiliserende) som en effekt av de tilsatte legeringselementene. Mangan, nikkel og kobber er γ -stabiliserende, mens krom, molybden og silisium er α -stabiliserende. (Porter & Easterling, 2000)

2.4.1 Karbon

Dette er det legeringselementet som, sammen med bor, påvirker herdbarheten mest. Ved å holde innholdet av karbon på et lavt nivå (0,05 – 0,1 %) vil man vanligvis unngå martensitt. (Grong, 1990) Karbon bidrar med økt strekkfasthet, flytegrense, hardhet og slitestyrke. Den øker herdbarheten til en viss grad og er billig. Ved for høyt innhold av karbon vil sveisbarheten samt slagseighet og duktilitet svekkes. (Arntsen, 2000)

2.4.2 Mangan

Mangan tilsatt i stål vil normalt øke seigheten i grovkornet varmpåvirket sone, gjennom en raffinering av mikrostrukturen. Allikevel kan seigringer av mangan i grunnmaterialet bidra til harde soner lokalt i HAZ. Tilsetting av mangan brukes for å øke sveisemetallets styrke og herdbarhet og har en gunstig effekt på dannelsen av aciculær ferritt (opp til ca 2 %). (Grong, 1990) Mangan senker herdetemperaturen, noe som har direkte sammenheng med at mangan er et austenitt-stabiliserende legeringselement i tillegg til at det nøytraliserer svovel og reduserer sprøhet. (Arntsen, 2000)

2.4.3 Silisium

Silisium er en svak ferrittdanner og har liten effekt på dannelse av aciculær ferritt. Silisium vil ha et relativt høyt herdebidrag noe som fører til en reduksjon i bruddseigheten. (Grong, 1990) Det fungerer som et deoksydasjonsmiddel i tillegg til at det øker fasthet, hardhet, herdbarhet og herdetemperaturen. Det reduserer også slagseigheten og bidrar til å gi lavere slitestyrke. (Arntsen, 2000)

2.4.4 Krom

Krom øker de mekaniske egenskapene som herdbarhet, hardhet, fasthet, slagseighet, varmebestandighet samt korrosjonsmotstanden, men reduserer samtidig sveisbarheten. (Arntsen, 2000)

2.4.5 Molybden

Tilsetning av molybden i stålet vil gi økt fasthet og hardhet samt at det bedrer herdbarheten. Det bidrar med å øke slitestyrken og varmemotstanden samtidig med at elementet forbedrer syrebestandigheten og slagseighet. Samtidig er molybden et kostbart legeringselement. (Arntsen, 2000)

2.4.6 Nikkel

Nikkel øker fasthet, herdbarhet og slagseighet. Elementet forbedrer syrebestandigheten og senker herdetemperaturen og i tillegg kan slagseigheten og varmebestandigheten bli redusert. (Arntsen, 2000)

2.4.7 Kobber

Kobber øker herdbarheten og fastheten i materialet og bidrar med raffinering av mikrostrukturen i HAZ. Det er også et kostbart legeringselement. (Grong, 1990)

2.4.8 Vanadium og Niob

Disse legeringselementene er utpregede karbid- og nitrid-dannere. De bidrar også med redusert seighet som følge av dannelse av sideplateferritt i grovkornet HAZ. (Grong, 1990)

2.4.9 Aluminium

Aluminium fungerer som et oksidasjonsmiddel og er finkorndannende. Det forbedrer også sveisbarheten og slagseigheten samt reduserer faren for eldning. (Arntsen, 2000)

2.4.10 Titan

Titan er en utpreget nitrid-danner i stål og kan være med på å begrense uønsket kornvekst i grovkornet HAZ. (Grong, 1990)

2.4.11 Bor

Bor er, sammen med karbon, det mest kraftig herdende elementet som vanligvis blir tilsatt i stål. (Grong, 1990)

2.5 Sveisbarhet

Sveisbarhet kan være vanskelig å tolke korrekt. Å si at et materiale ikke sveisbart kan være direkte feil, da praktisk talt alle materialer lar seg sveise bare man gjennomfører det på riktig måte. Ved sveisbarhet menes hvordan man kan sveise et materiale og samtidig oppnå en ønsket sveisekvalitet. Kvaliteten på en sveis er avhengig av form og antall defekter som man må regne med finnes i sveisegodset. Dette under forutsetning at defektene er av en godkjent størrelsesorden. Man må forhindre eller redusere danningen av sveisedefekter og redusere restspenninger. (Mattson & Hammer, 2001)

For å få et mål på et ståls herdbarhet i sammenheng med sveising er det utviklet formel, med fellesbetegnelsen karbonekvivalent. Det finnes flere formel for beregning av en slik karbonekvivalent, flere er ofte kun begrenset til spesifikke legeringer. Den mest brukte og kjente formelen for karbonekvivalent er CE, som er utviklet av International Institute of Welding (IIW). Legeringselementene i formelen påvirker, i ulik grad, stålets herdbarhet. Formelen under er utviklet gjennom eksperimenter og gjelder kun for karbon-, karbonmangan- og mikrolegerte stål. Et stål anses som godt egnet for sveising ved romtemperatur hvis karbonekvivalenten, CE, ikke overstiger 0,40 %. I tillegg er det vanlig å sette en grense på 0,25 % karbon når man prater om sveisbarhet. For høy verdi av CE gir økt risiko for danning av martensitt og dermed også økt risiko for hydrogensprekker. (Mattson & Hammer, 2001)

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

For stål med et karboninnhold lavere enn 0,22 % og med en avkjølingshastighet, $\Delta t_{8/5}$, mindre enn 6 sekunder, anbefales det å bruke karbonekvivalentformelen, P_{cm} . Dette er en formel som er utarbeidet av japanske forskere (Ito & Besseyo) og som skal gi et bedre samsvar mellom kjemisk sammensetning og hydrogensprekker. P_{cm} er forkortelse for «Parameter Crack Measurement» og vises nedenfor. Grensen for sveisbarhet settes vanligvis til 0,22 %. (Arntsen, 2000) Formelen har mindre koeffisienter for den substitusjonelle løsningen sammenlignet med CE. Ved et lavere karboninnhold vil transformasjonskinetikken være mer sensitiv til karbon enn til de substitusjonelle oppløste elementene. (H. K. D. H. Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

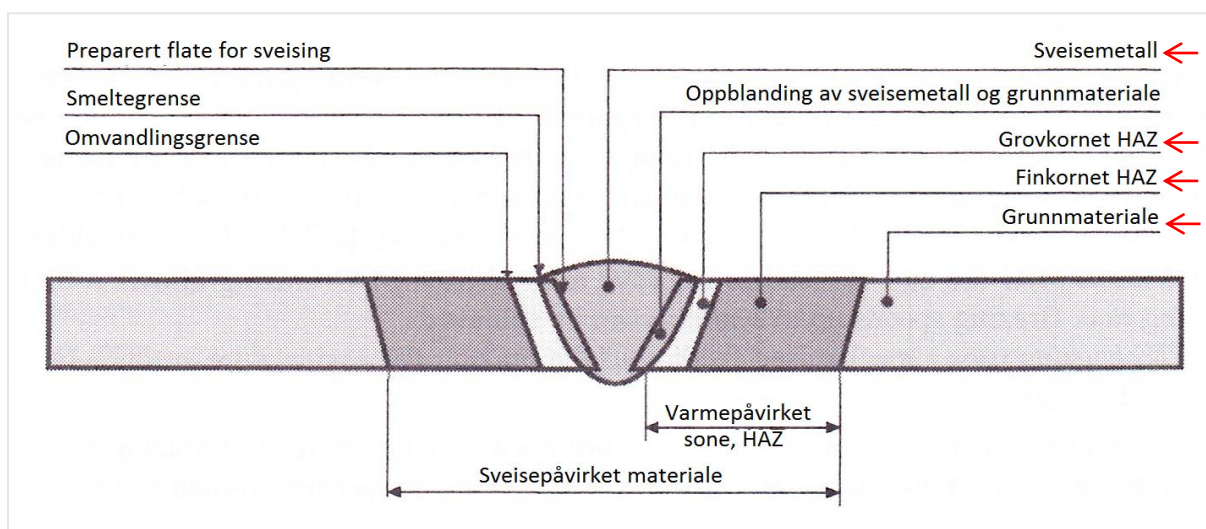
$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B$$

For å bedømme et ståls sveisbarhet benyttes også CCT-diagram. Denne type diagram er basert på strukturomvandlingens avhengighet av avkjølingshastigheten ved avkjøling fra 800 °C til 500 °C. Se kapittel 2.2.1 som omhandler avkjølingshastighet av stål. (Mattson & Hammer, 2001)

2.6 Generell sveiseteori

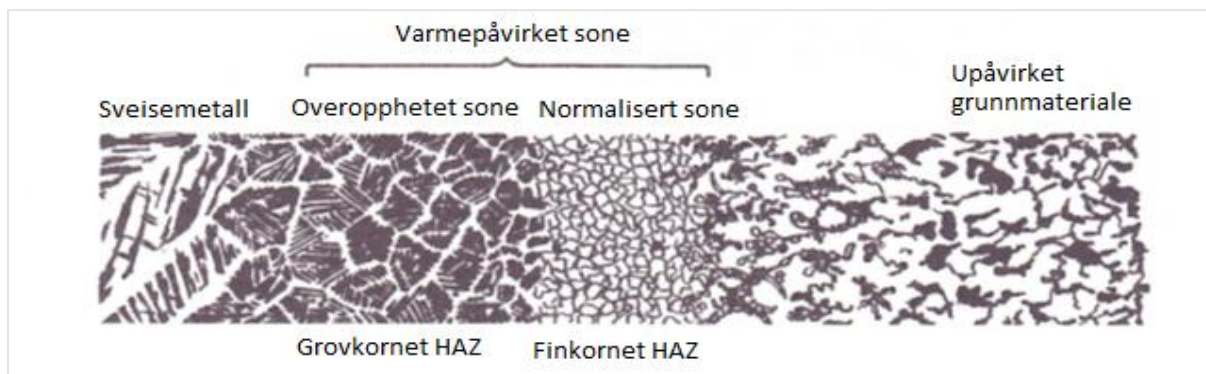
Sveising er en av de viktigste bearbeidingsmetodene i moderne industri. Fellesbetegnelsen sveising er sammenføring av to eller flere metalliske materialer, men også plast kan sveises. Det skilles mellom smeltesveising og pressveising. I denne oppgaven tas det kun for seg smeltesveising der man har elektrisk bueutladning som varmekilde. (Halmøy, 2007)

Figur 2.12 under viser en typisk sveiseforbindelse bestående av tre soner knyttet til grad av varmpåvirkning; sveisemetall, varmpåvirket sone (HAZ) og upåvirket grunnmateriale. I varmpåvirket sone har vi en grovkornet og finkornet sone. (Mattson & Hammer, 2001)



Figur 2.12: Skisse av en typisk sveiseforbindelse med tilhørende soner. (Weman, 2003)

Figur 2.13 viser hvordan varmen fra sveiseprosessen påvirker grunnmaterialet som grenser mot sveiseforbindelsen. I finkornet HAZ vil man ha en normalisert mikrostruktur grunnet oppvarming til rett over A_3 . I grovkornet HAZ vil man ha kornforgroving på grunn av oppvarming over A_3 , opp imot metallens smeltgrense. Denne delen av HAZ er ofte preget av sideplateferritt. Sveisemetallet, som i dette tilfellet er lagt med én streng, er også preget av sideplateferritt. Når man sveiser flere strenger i kontakt med hverandre vil en del av sveisegodset bli oppvarmet og nedkjølt flere ganger, noe som gir en ujevn struktur i sveiseforbindelsen. Siste sveisestreg vil være som på Figur 2.12. (Weman, 2003)



Figur 2.13: Skisse som viser inndelingen av HAZ etter mikrostruktur, sammen med sveisemetall og upåvirket grunnmateriale. (Weman, 2003)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Det finnes flere forskjellige sveisemetoder og fugetyper. De foregående to skissene illustrerer en vanlig buttssveis. Påleggssveising er en sveiseforbindelse som ikke har som hensikt å forbinde to materialer sammen. Denne type sveiseforbindelse brukes for å gi ståloverflaten større motstandskraft mot slitende belastninger eller korrosjonsangrep. Metoden brukes også når man trenger å reparere nedslitte overflater, derav navnet reparasjonssveising. (Mattson & Hammer, 2001)

2.6.1 Varmeomsetting i arbeidsstykket

Det termiske forløpet i arbeidsstykket under sveising, er av stor betydning for resultatet av sveiseprosessen. Materialet i en sveiseforbindelse er preget av hurtig oppvarming og rask avkjøling, gjerne opptil flere ganger ved sveising av flere lag. Ved varmeomsetting i arbeidsstykket, menes tilført varme, hvor mye av materialet som smelter og temperaturforløpet i og i nærheten av sveisesonen. Dette er det viktig å ha god kontroll på med tanke på det metallurgiske resultatet av sveisingen, samt for spenninger og deformasjoner som kan oppstå under størkning. (Halmøy, 2007)

Ved sveising brukes en konsentrert energikilde, i form av en elektrode, for å minimalisere tap av varme til omgivelsene. Varmen som blir tilført fra elektroden er forskjellig fra metode til metode. Denne tilførte varmen kalles brutto varmefluks per flateenhet og oppgis i W/mm^2 . Det er allikevel kun en mindre del av denne varmetilførselen som tas opp direkte i arbeidsstykket, som skyldes i hovedsak varmetap til omgivelsene. Dette varmetapet ivaretas av bue-virkningsgraden, η (Grong, 1990);

$$\eta = \frac{q_{netto}}{q_{brutto}},$$

der q_{netto} og q_{brutto} er netto og brutto tilført varmemengde per tidsenhet ved sveising.

Viktige materialeegenskaper som varmeledningsevne og termisk diffusivitet vil i praksis variere med temperaturen, men for å beskrive varmefordelingen ved sveising ved hjelp av enkle analytiske modeller må man se på disse størrelsene som temperatur-uavhengige konstanter. (Grong, 1990)

Likningen under er kjent som Rosenthals likning for tykk plate og beskriver temperaturfordelingen i materialet rundt en punktformet varmekilde. I tillegg til dette er det tatt følgende antakelser for likningen (Grong, 1990):

- Punktformet varmekilde
- Ingen varmetap til omgivelsene
- Tredimensjonal varmeledning (neglisjerbar godstykkelse)
- Alle termiske data betraktes som konstanter
- Uten bruk av smeltende elektrode

$$T - T_0 = \frac{W}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{R} \cdot e^{-\frac{v}{2a}(R+x)}$$

T:	Temperatur [°C]
W:	Tilført konstant netto effekt ($W = \eta \cdot U \cdot I$) [W]
v:	Konstant sveisehastighet [m/s]
R:	Avstand fra kilden ($R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$) [m]
η :	Bue-virkningsgrad
λ :	Varmeledningsevne [J/kg-K]
a:	Termisk diffusivitet [m^2/s]

2.6.2 Sveiseparametere

Ved utvikling av sveiseprosedyrer er det flere sveisetekniske parametere som må bestemmes ut ifra ønsket sluttprodukt og kvalitet.

- Strøm
- Spenning
- Polaritet
- Sveisehastighet
- Varmetilførsel
- Gass

Blant disse parameterne er det verd å nevne mer om varmetilførsel og beskyttelsesgass ved sveising.

2.6.2.1 Varmetilførsel

Ved sveising menes varmetilførsel som den energimengde som tilføres arbeidsstykket per mm sveis, og er gitt ved kJ/mm. Varmetilførselen har betydning for sveisens avkjølingshastighet og beregnes etter følgende formel (Weman, 2003):

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \cdot \eta \quad [kJ/mm]$$

Variabler:

U: Lysbuespenning [V]

I: Sveisstrøm [A]

v: Sveisehastighet [mm/min]

η : Virkningsgrad for benyttet sveisemetode

Virkningsgrad for ulike sveisemetoder:

MMA: 0,75

MIG/MAG: 0,90

SAW: 0,90

TIG: 0,80

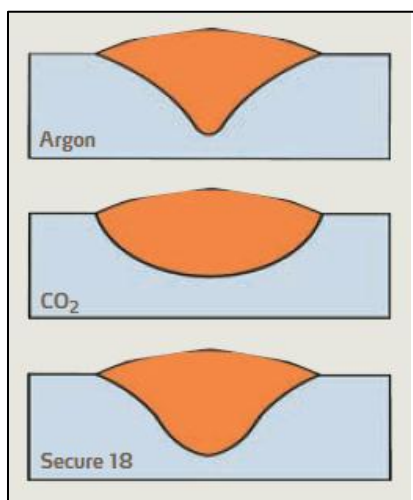
Som man kan se av formelen over er det lysbuespenning, sveisestrøm og sveisehastighet som må reguleres for å oppnå ønsket varmetilførsel.

Ved bruk av for lav varmetilførsel kan det gi en ugunstig rask avkjølingshastighet av varmepåvirket del av sveiseforbindelsen. For å oppnå en mikrostruktur med ønskede mekaniske egenskaper, må man velge en gunstig varmetilførsel. Man må da ta hensyn til sveisemetode, godstykkelse og arbeidstemperatur. Hvis man ikke tar hensyn til disse variablene kan man risikere store restspenninger og deformasjoner i sveiseforbindelsen som også kan lede til herdesprekker. (Mattson & Hammer, 2001)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

2.6.2.2 Beskyttelsesgass til sveising

Beskyttelsesgassens hovedoppgave er å beskytte smeltebadet mot luften rundt. Ved de høye temperaturene som oppstår i en lysbue kan oksygen, nitrogen og fuktighet reagere kjemisk med mange materialer og dermed føre til inneslutninger eller porer i sveisemetallet, noe som kan gå på bekostning av sveisens mekaniske egenskaper. Valg av beskyttelsesgass kan påvirke forhold som lysbuenes form, dråpeavgang, innbrenningsprofil, sveisens overflate og form, sveisehastighet og tendens til kantsår. Figur 2.14 viser ulike innbrenningsprofiler knyttet til type dekk-gass. Valg av sveisemetode vil også påvirke innbrenningsprofilen ved noen typer dekk-gass, blant annet Argon. (Yara Praxair, 2009b)



Figur 2.14: Typiske innbrenningsprofiler ved forskjellige beskyttelsesgasser. (Yara Praxair, 2009b)

Riktig valg av dekk-gass vil i stor grad være avgjørende for produktiviteten og da også total-kostnadene knyttet til sveiseoperasjonene. Ved behov for en ikke-reaktiv dekk-gass brukes som oftest Argon og Helium (edelgasser). (Yara Praxair, 2009b)

- Argon 4,6: Brukes ved TIG-sveising av alle sveisbare materialer og anvendes ved høye krav til renhet og poresikkerhet. (Yara Praxair, 2009b) Argon 4.6 er dekk-gass med 99,996 % Argon. (Yara Praxair, 2009a)
- Secure 18: Denne type dekk-gass er Argon blandet med 18 % CO₂ (Yara Praxair, 2009a) og er svært godt egnet ved rørtrådsveising i alle strømområder og sveisestillinger. Den gir en stabil lysbue og god poresikkerhet og innbrenning. (Yara Praxair, 2009b)
- CO₂: Ren CO₂ brukes ved buesveising, men kun over et kort tidsrom. (Weman, 2003)

2.6.3 Buesveisemetoder

Ved buesveising brukes det en dekk-gass som er i stand til å lede elektrisk strøm fra sveiseelektroden til arbeidsstykket. Type gass som brukes er av stor betydning og kan variere med ulike sveisemetoder. For at gassen skal lede strøm, må den være ionisert. Elektroden kan være både negativ og positiv. Tabell 2.1 viser en oversikt over tre forskjellige buesveisemetoder. (Halmøy, 2007)

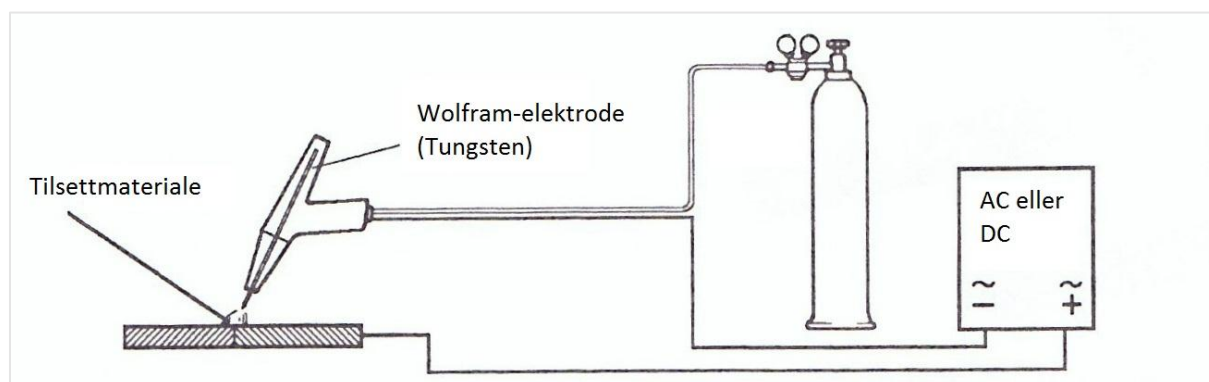
Tabell 2.1: Kjente buesveisemetoder med engelsk terminologi og internasjonalt referansenummer. (Weman, 2003)

Sveisemetode ^{*)}	Engelsk terminologi	Referanse nummer
TIG (Tungsten Inert Gas)	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	141
Dekkede elektrode sveising	SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	111
Rørtråd	GFCAW (Gas Flux Cored Arc Welding)	136

^{*)} Navn mest brukt i norsk sammenheng

2.6.3.1 TIG

TIG er en dekk-gassveisemetode med en ikke-smeltende wolframelektrode. Tilsettmaterialet mates inn for hånd eller mekanisk i forkant av buen og smeltebadet. Dekkgassen som vanligvis brukes er edelgassen argon. Ved denne sveisemetoden får man en stabil klokkeform på sveisebuen som et resultat av wolframelektroden som ikke smelter. Elektroden er nesten alltid negativ, fordi varmeutviklingen da er minst, men kan brukes med begge polariteter. Metoden kan i prinsippet brukes på alle metalliske materialer, men noen spesielle hensyn kan måtte tas med enkelte materialtyper. (Halmøy, 2007)



Figur 2.15: Prinsippskisse for TIG-sveising. (Weman, 2003)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

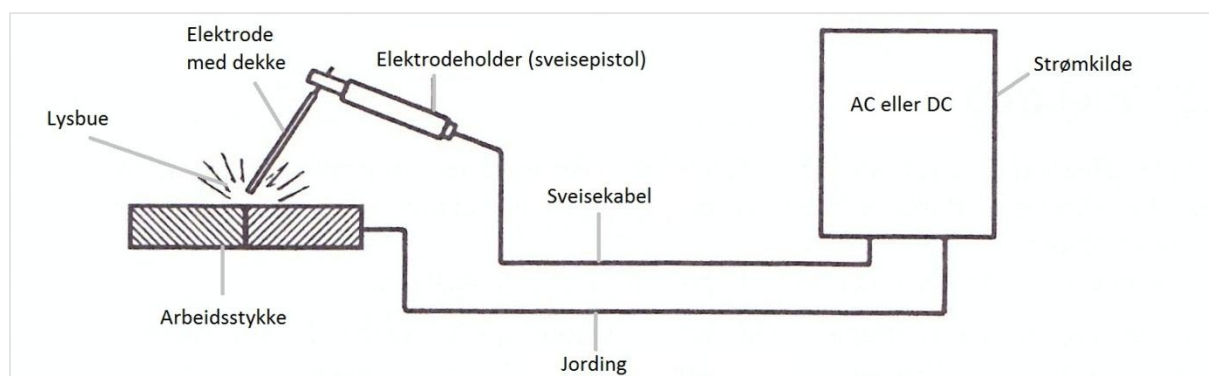
2.6.3.2 Dekkede elektrodesveising

Elektroden er en metallstav med et dekke utenpå som festes manuelt på sveispistolen. Metallstaven leder strømmen til arbeidsstykket og dekket avgir både dekk-gass og slag som begge to beskytter smeltebadet. Metallpinnen er belagt med et dekke sammensatt av fluorider, karbonater, oksyder, legeringselementer og ibland cellulose. Dekkgassen som dannes er vanligvis CO₂. Elektroden smelter og drypper ned i smeltebadet og den må mates for hånd samt skiftes ut når det er en mindre bit igjen av staven. Ved denne sveisemetoden vil sveisebuen ikke være like stabil som ved TIG-sveising. Dette er grunnet at elektroden smelter og det vil skje kortslutninger idet smeltesråpene løsner og drypper ned i smeltebadet. (Halmøy, 2007)

Det finnes tre viktige grupper av elektrodedekke; sur, basisk og rutil. Disse har forskjellige egenskaper og blir valgt ut ifra blant annet sveisestilling, mekaniske egenskaper og ved krav til maks hydrogeninnhold. Dekket har flere nyttige funksjoner. I tillegg til de allerede nevnte funksjonene vil dekket bidra med følgende:

- Styre lysbuen og smeltesråpene mot smeltebadet
- Stabiliserer buen med Na- og K-forbindelser
- Legere sveismetallet med blant annet C, Si, og Mn.

(Halmøy, 2007)

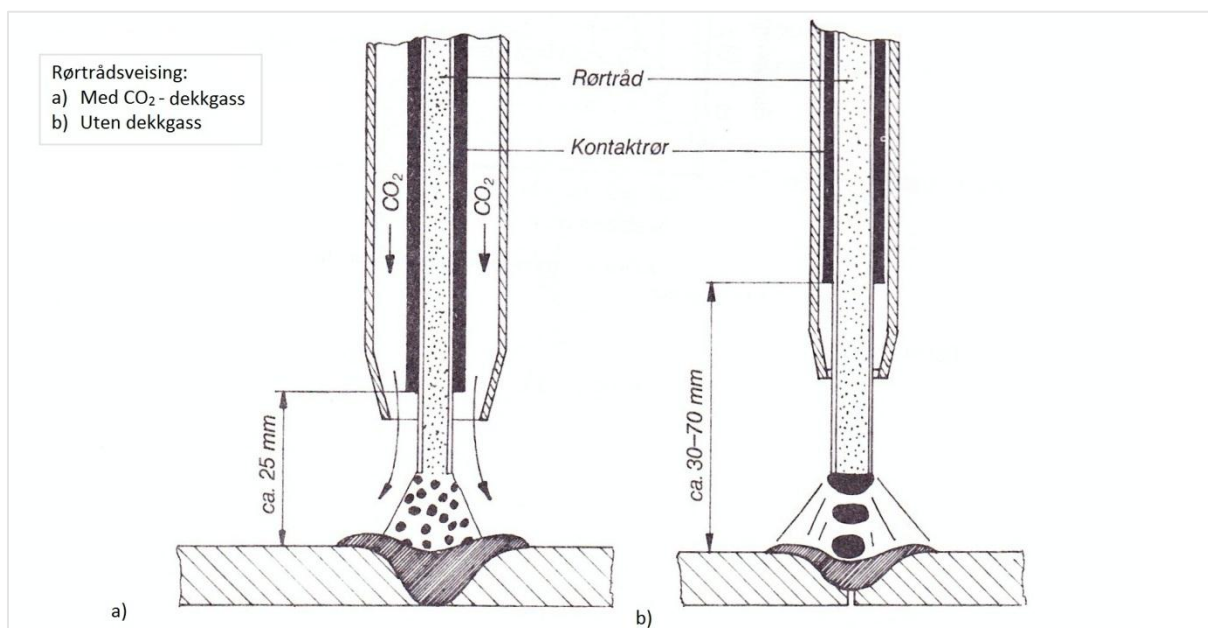


Figur 2.16: Prinsippkisse for sveising med dekket elektrode. (Weman, 2003)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

2.6.3.3 Rørtråd

Rørtrådsveising kan utføres med eller uten ytre dekk-gass. For karbonstål er det vanligst med gassbeskyttet rørtrådsveising. Tråden er en hul, rørformet tråd som er fylt med et pulver, pulverfyllingen kan blant annet deles i basisk og rutilt pulver. I pulveret kan det lett tilsettes legeringselementer som gir ønskede mekaniske egenskaper av sveis. Hovedbestanddelene i pulveret vil smelte i buen og størkne på smeltebadet som et slag som gir ekstra beskyttelse. Ved stillingsveising bidrar også slagget til å holde smeltebadet på plass. Dekkgassen er som oftest en blanding av argon og CO₂, men CO₂ kan også brukes alene. Den elektriske ledningen skjer kun i det ytre røret. (Halmøy, 2007)



Figur 2.17: Prinsippkisse for rørtrådsveising, a) med CO₂-dekk-gass og b) uten dekk-gass. (Simensen, 1973)

2.6.4 Varmebehandling av sveis

2.6.4.1 Forvarming

Forvarming brukes for å senke avkjølingshastigheten (kapittel 2.2.1), slik at en får en mikrostruktur som gir gunstige mekaniske egenskaper. Arbeidsstykket varmes opp til ønsket temperatur før sveisingen tar til og må holdes ved den temperaturen under sveising, derav navnet arbeidstemperatur. Forvarming brukes også for å fjerne fuktighet på ståloverflaten, ved å varme opp arbeidsstykket til minimum 20 °C. Å bestemme nødvendig forvarme kan gjøres teoretisk ved hjelp av formler, men det finnes også enklere metoder som til gjengjeld er mer unøyaktige. Felles for disse metodene er at de tar hensyn til tilført varmemengde og varmebortledning som er avhengig av fugetype og godstykkelse. Selv den minste endring i tilført varmemengde og forvarmingstemperatur er utslagsgivende for sveisens mekaniske egenskaper.

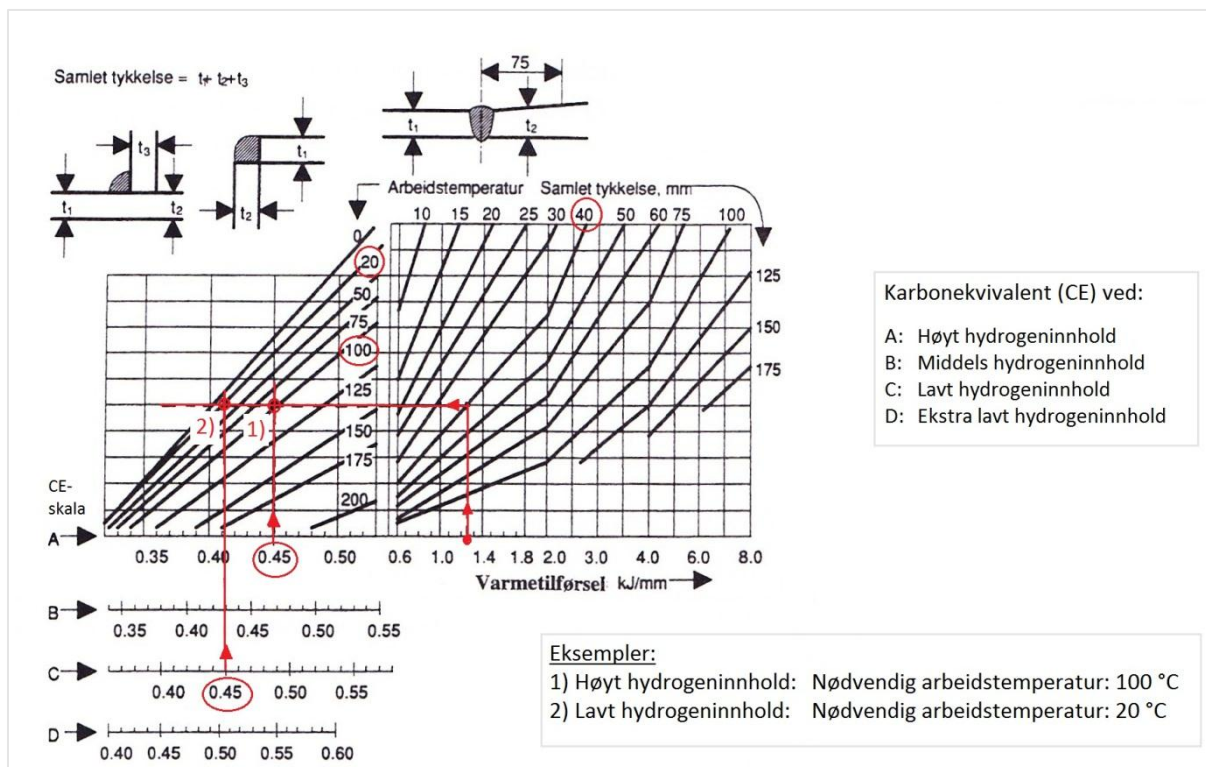
(Barka, 1985)

For karbon- og karbonmanganstål er det flere faktorer som påvirker tilbøyeligheten for sprekkdannning og dermed bestemmer forvarmingstemperaturen. Herdbarheten til stålet er en viktig faktor, og ved hjelp av karbonekvivalenten kan herdbarheten til ulike stål sammenlignes. Det er også viktig å ha kontroll på varmetilførselen. Hydrogeninnholdet er viktig å holde på et minimumsnivå og kan påvirkes ved valg av sveisemetode og tilsettmateriale. Sveisespenningen bestemmes ut ifra fugetype og godstykkelse. Den samlede godstykkelsen er det også viktig å ta hensyn til da avkjølingshastigheten øker med materialtykkelsen. (Mattson & Hammer, 2001)

For alminnelig ulegert konstruksjonsstål er det utarbeidet et nomogram for å bestemme arbeidstemperaturen. Dette nomogrammet gir en sammenheng mellom varmetilførsel, godstykkelse, sveisemetode, materialets herdbarhet uttrykt ved karbonekvivalenten (CE) og arbeidstemperaturen. Karbonekvivalenten er delt inn i fire grupper, avhengig av hydrogeninnhold i sveiseavsett. Figur 2.18 under viser et slikt diagram, med to eksempler på fremgangsmåte. (Arntsen, 2000)

Det er ofte knyttet strenge krav til sikkerhet i olje og gass industrien, spesielt i tilknytning til varmt arbeid. Det er derfor vanlig å sette en øvre begrensning på 200 °C ved bruk av forvarme. (Norwegian Technology Standards Institution, 1998)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 2.18: Nomogram for å bestemme forvarmingstemperatur. To eksempler ut ifra mengde hydrogen i sveisemetall, karbonekvivalent lik 0,45, 40mm samlet tykkelse og med en varmetilførsel på 1,2 kJ/mm. (Arntsen, 2000)

2.6.4.2 Mellomstrengstemperatur

For å ha kontroll på arbeidstemperaturen, blir temperaturen målt i stålet etter forrige streng, før neste streng legges. Denne temperaturen ligger vanligvis på 200 – 250 grader.

2.6.4.3 Ettervarming (Post Weld Heat Treatment)

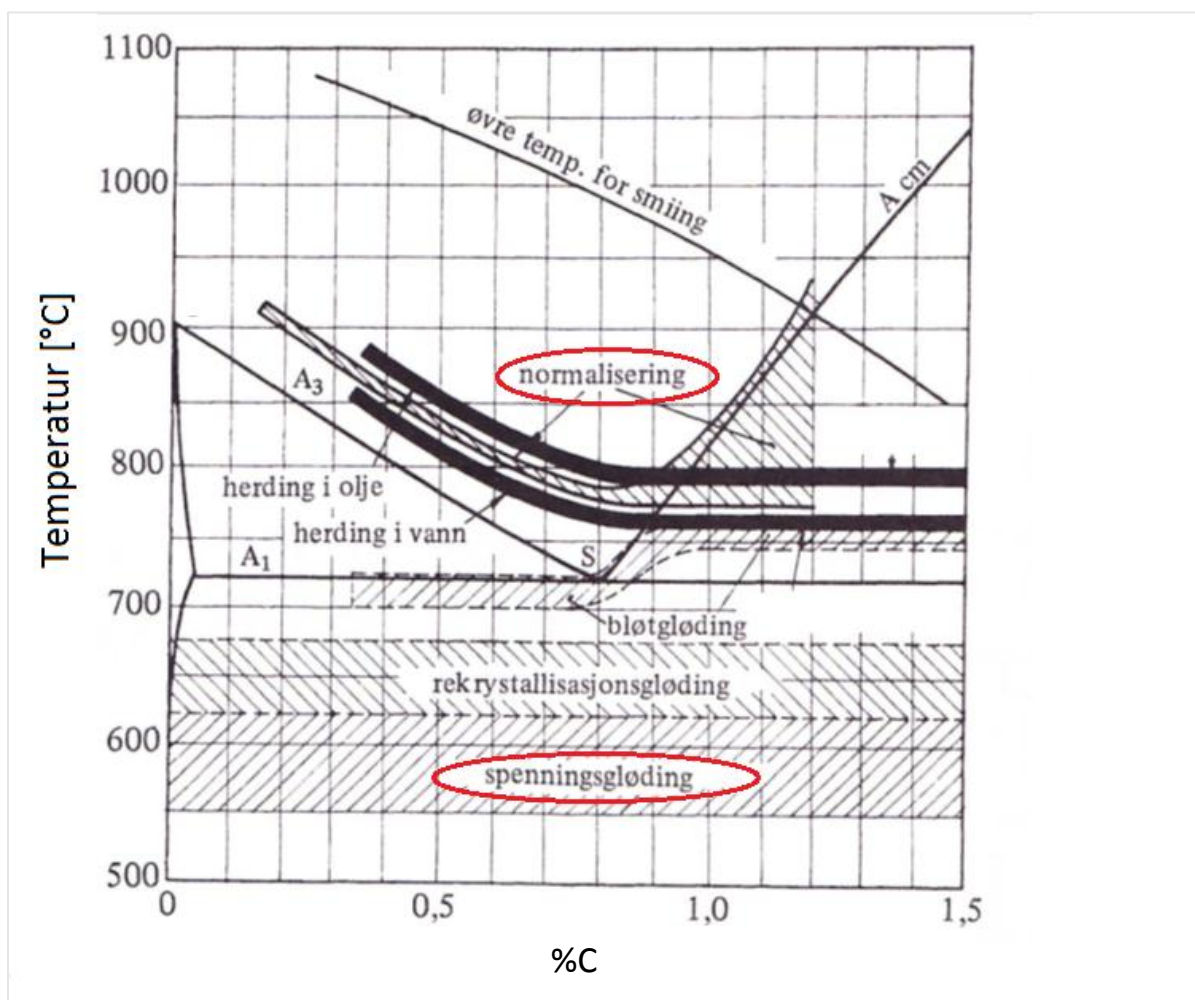
Ved å varmebehandle en sveiseforbindelse ved en temperatur opp imot 760 °C vil man minke spenningene i metallet som er oppstått etter størkning. En varmebehandling over 760 °C vil transformere martensitten tilbake til austenitt og ved en kontrollert avkjøling vil man kunne unngå at martensitt dannes igjen. Hvor lenge varmebehandlingen skal vare er ofte en funksjon av materialtype og tykkelse på sveisegodset som skal varmebehandles. Så lenge varmebehandlingen utføres riktig vil den ha flere fordeler. En av fordelene er som nevnt, minke spenninger mellom sveis og grunnmetall. Store spenninger kan oppstå i sveisemetallet når mikrostrukturen er dominert av martensitt. Anløping øker styrke og seighet samt minker hardheten i sveisemetall og HAZ. Ved varmebehandling av karbonstål bør ikke temperaturen overstige 760 °C fordi man vil unngå uønsket kornforgroving. (Antaki, 2005)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Ulike former for varmebehandling inkluderer blant annet normalisering og spenningsgløding (Antaki, 2005);

- Normalisering er en varmebehandling der stålet varmes opp til rett over ferritt-austenitt transformeringsområdet, som ligger på rundt 800 °C, for deretter å avkjøles sakte i luft. Stålets mikrostruktur endres når temperaturen går over 800 °C og forandres igjen ved avkjøling. Resultatet blir at tidligere søylekrystaller blir små og runde, mens store krystaller blir mindre. Spenningene i stålet reduseres til et minimum. Ved sveising benyttes denne metoden sjelden.
- Spenningsgløding er en metode for varmebehandling der stålet sakte blir varmet opp til en temperatur på rundt 600 °C for karbonstål med en holdetid på minimum en time for deretter å la den sakte avkjøles. Dette skal minske spenningsene i mikrostrukturen og senke hardheten.

Figur 2.19 under viser et fasediagram for ulegert stål som blir brukt for fastsettelse av varmebehandlingstemperatur for de forskjellige varmebehandlingsmetodene.



Figur 2.19: Anbefalt varmebehandlingstemperatur for ulegert stål, avhengig av karboninnholdet. (Almar-Næss, 2003)

2.6.5 Sveiseprosedyredokumentasjon

Det er viktig å spesifisere en sveiseprosedyre grundig da det er mange variable involvert, i tillegg til de mange sveisefeil som kan oppstå og dermed svekke sveiseforbindelsens integritet. Ved kvalifisering av sveiseprosedyrer blir det prøvesveiset etter prosedyrespesifikasjonen for så å teste sveiseforbindelsen destruktivt (DT) og ikke-destruktivt (NDT). Spesielt i olje- og gass-industrien stilles det høye krav til dokumentasjon av sveiseprosedyrer, i tillegg til at det kan være satt særskilte krav knyttet til sveiseforbindelsens mekaniske egenskaper. Det må utarbeides én eller opptil flere sveiseprosedyrer knyttet til hver type forbindelse som skal sveises. (Halmøy, 2007)

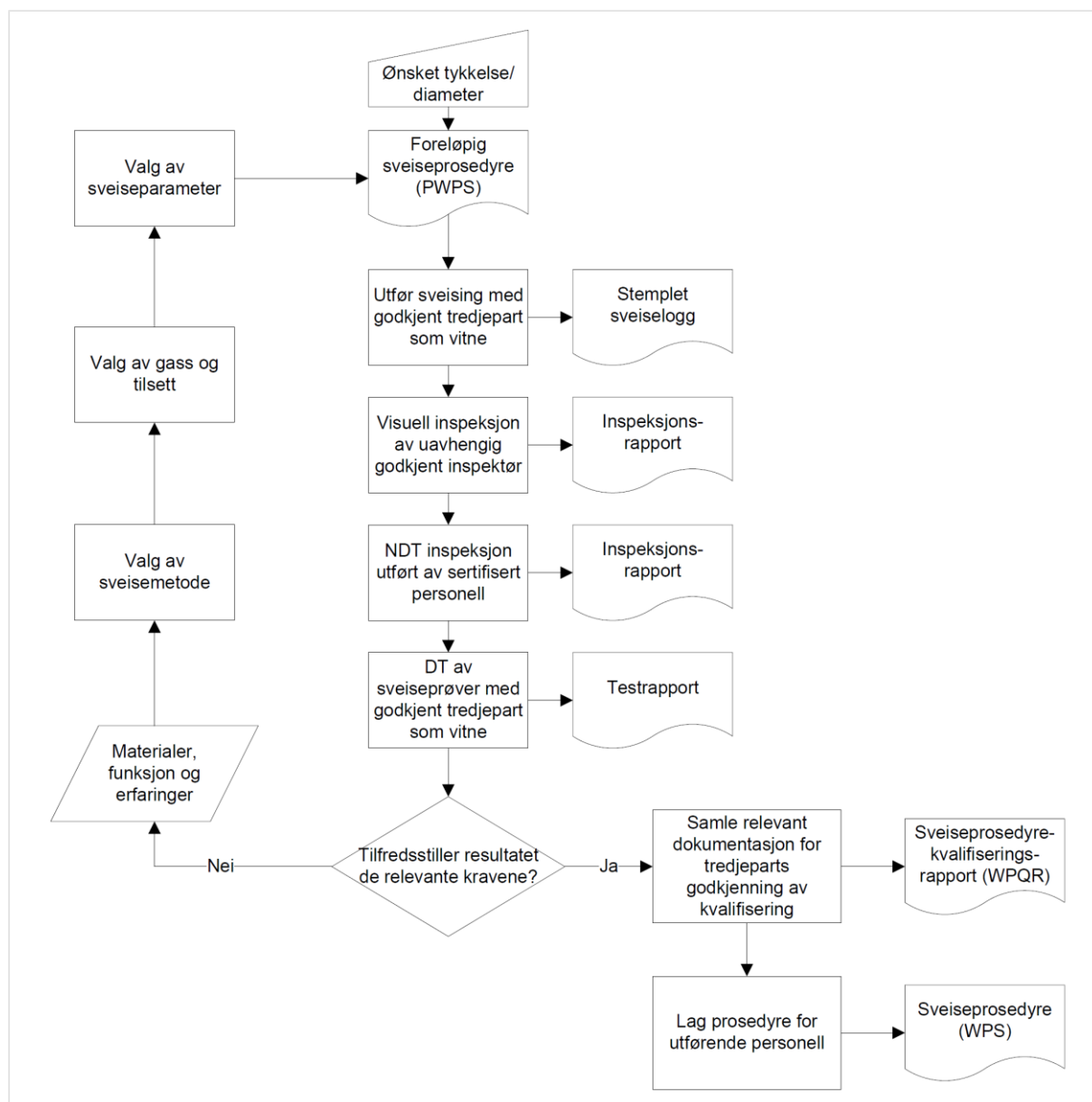
Når en sveiseprosedyre skal utvikles er det strenge krav til hvordan man skal gå frem. Under står det listet opp tre dokumenter som må lages, i den rekkefølgen de står i: (Sveiseteknologi AS, 2012)

- **pWPS** (preliminary Welding Procedure Specification):
Et rettledende dokument som er utviklet av sveiseteknisk personell før oppsveising av prosedyre.
- **WPQR** (Welding Procedure Qualification Record):
Et kvalitetsdokument som er basert på oppsveising av sveiseprosedyre i henhold til standarder for utvikling av sveiseprosedyrer. Eksempel på standard er NS-EN ISO 15614-1.
- **WPS** (Welding Procedure Specification):
En spesifisering av prosedyren som er et verkstedsdokument laget på grunnlag av WPQR. WPS fungerer som en bruksanvisning for sveiseren ved produksjon.

Ved utarbeiding av kvalifiseringsunderlaget for endelig sveiseprosedyre, vil det bli utført en sveiseprosedyretest basert på pWPS. En sveiseprosedyretest kalles ofte også produksjonstest. Under en produksjonstest vil sveisetekniske parametere gitt i pWPS justeres noe opp og ned, dette gjøres for å grovkartlegge toleranseområdene. For å sjekke sveiseforbindelsens mekaniske egenskaper gjennomføres det både destruktiv(DT)- og ikke-destruktiv testing(NDT). Samlet sveisedokumentasjon etter godkjenning av prosedyre skal inneholde WPS, WPQR, rapport fra DT og NDT samt materialsertifikater for grunnmateriale og sveisetilsett. Ved en eventuell spenningsgløding skal også dokumentasjon fra dette legges ved. (Halmøy, 2007)

Det er lett å blande begreper med tanke på de forskjellige dokumentene, testing og parameter knyttet til kvalifisering av en sveiseprosedyre. For å gjøre prosessen rundt planlegging og godkjenning av sveiseprosedyrer mer oversiktlig har Sveiseteknologi AS utarbeidet en anbefaling for hvordan man skal gå frem. Figur 2.20 på neste side viser et flytdiagram laget på bakgrunn av denne anbefalingen. (Sveiseteknologi AS, 2012)

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

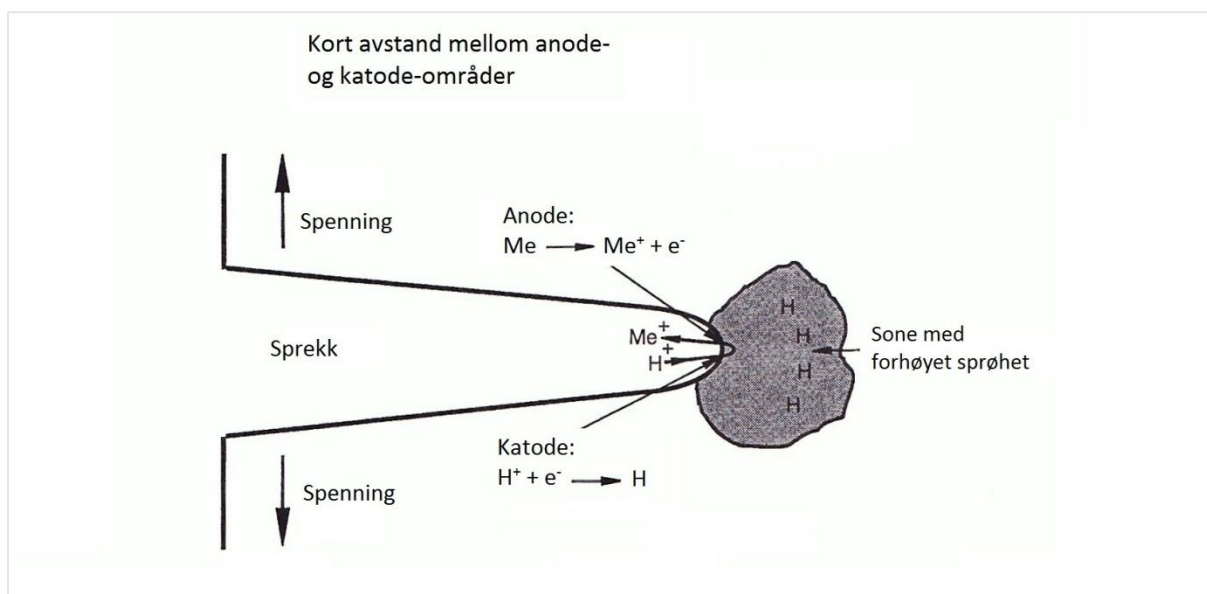


Figur 2.20: Flytdiagram for utvikling av sveiseprosedyredokumentasjon

2.7 Sprekkfenomenen ved sveising

Hydrogensprekker, også kaldt kaldsprekker, oppstår ved ca 200 °C og ofte flere timer etter endt sveising. Årsaken til sprekkene er et samspill mellom hydrogen, harde og lite duktile strukturdanninger (som martensitt), og spenninger. Hydrogen kommer inn i sveisen fra hovedsakelig fukt i elektrodedekket eller fluks. For å minske risikoen for sprekkdannning kan man diffundere bort hydrogenet gjennom en prosess kalt soaking, der man holder materialet varmt ved ca 200 °C. I tillegg til kaldsprekker har vi krympesprekker som er forårsaket av krympespenninger der hydrogenet nedsetter sveisens duktilitet. Laveste hydrogeninnhold oppnås ved MIG- og TIG-sveising eller sveising med basiske elektroder. Sveising med sure eller rutile elektroder gir vanligvis høyere hydrogenopptak i sveisen på grunn av hydrogenholdige komponenter i dekket. (Mattson & Hammer, 2001)

Et vanlig sprekkfenomen for stål i olje- og gass-industrien, skyldes innholdet av hydrogensulfid, H₂S, i produksjonsvæsker. Dette er en korrosjonsform som kalles H₂S-spenningskorrosjon (SSC). Tilbøyeligheten for at denne type spenningskorrosjon skal oppstå er avhengig av type stål, mikrostruktur og konsentrasjon av H₂S i omgivelsene. Spenningsterskelen for sprekkning er knyttet til flytegrensen i materialet, men i praksis brukes ofte et hardhetskriterium for å rangere ulike stål med hensyn på motstand mot denne type oppsprekking. Figur 2.21 viser mekanismen ved denne form for sprekkdannning og vekst. I slike sure miljø vil jern-atomene (Fe²⁺) kombineres med Sovel (S²⁻) og danne jernsulfid (FeS), mens de frie hydrogenatomene (H⁺) diffunderer inn i materiale og danner hydrogengass (H₂) (Fe + H₂S → FeS + H₂). Danning av hydrogengass i metallet øker spenningen i materialet og kombinert med en sprø mikrostruktur kan vi få meget rask sprekkvekst. (Grong, 1994)



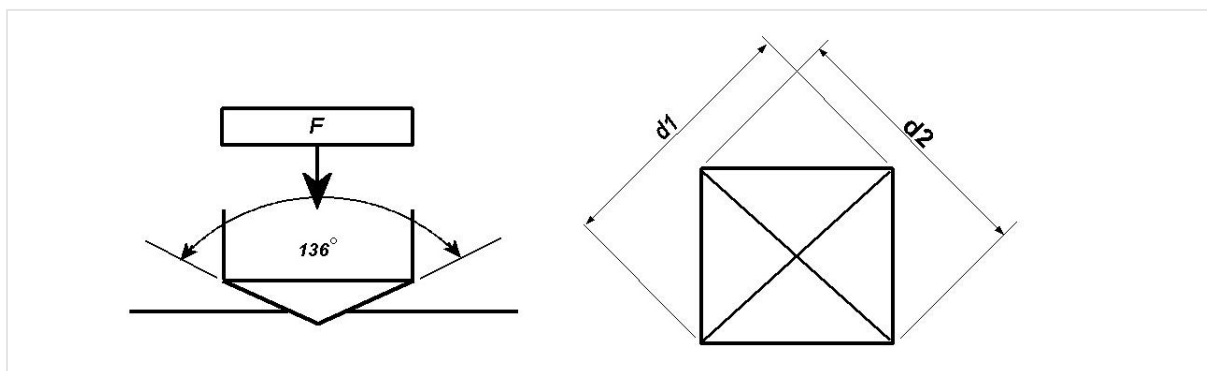
Figur 2.21: Mekanisme for hydrogenopptak ved sprekkvekst grunnet katodisk spenningskorrosjon. (Grong, 1994)

De metallurgiske forandringene som skjer ved sveising av karbon- og lavlegert stål har negativ innvirkning på deres motstand mot H₂S-spenningskorrosjon. Hardheten i sveiseforbindelsen spiller en viktig rolle ved å bestemme materialets motstand mot SSC og hardhetskontroll er en akseptert metode for å unngå dette fenomenet. (The International Organization for Standardization, 2009)

2.8 Mekanisk prøving

2.8.1 Vickers hardhetsmåling

Hardhet betegnes som et materiales motstand mot lokalisert plastisk deformasjon. Dette er en mekanisk egenskap for flere typer materialer og kan måles ved blant annet Vickershardhet. (HV). Ved Vickers metode for hardhetsmåling blir en liten diamant trykket inn i testmaterialet med en bestemt belastning, F , og en bestemt holdetid. Diamanten har en kvadratformet rot og spissen danner en vinkel på 136° . (Almar-Næss, 2003)



Figur 2.22: Prinsippskisse for måling av Vickers hardhet. (England, 2008)

Figur 2.22 viser hvilke variable som inngår i utregning av Vickers hardhet. Hardheten beregnes ut ifra følgende forenklede formel (Almar-Næss, 2003):

$$HV = \frac{1,854F}{d^2}$$

Der d er midlere lengde av diagonalen d_1 og d_2 gitt i mm og F er gitt ved kilo belastning multiplisert med gravitasjonskonstanten, g ($\approx 9,82 \text{ m/s}^2$).

Man skiller samtidig mellom ulike lastområder for Vickers metode for hardhetsmåling. Dette er grunnet at Vickers hardhetsprøving ikke er uavhengig av påført last, som vil si at hardhetsverdiene vil øke med avtagende belastning når man kommer under 30 N. Årsaken til dette finnes det flere teorier om, som ikke går nærmere inn på her, men det er tydelig mange faktorer som spiller inn. Tabell 2.2 under viser inndeling og betegnelse for de forskjellige lastområdene. Hardhetssymbolet skal skrives bak hardhetsverdiene når de listes opp. For eksempel betyr «250 HV 10»; en Vickers hardhetsverdi på 250 utført med en last på 10 kg, eller en nominell belastning på 98,07 N ($F = m \cdot g$). Pålastningsperioden skal vare fra 2 til maks 10 sekunder. Dette er tiden diamanten bruker på å lage inntrykket av diamanten. Holdetiden, er tiden da Vickers-diamanten holdes i ro etter endt pålastningstid, og ligger vanligvis på mellom 10 og 5s. Hvis holdetiden avviker fra dette, skal den nevnes sammen med hardhetssymbolet. For å bruke forrige eksempel så skriver vi; «250 HV 10/20», der 20 står for en holdetid på 20 sekunder. (Olsen, 2002)

Tabell 2.2: De tre belastningsområdene som Vickersprøving er delt inn i. (Olsen, 2002)

Område for prøvekraften, F [N]	Hardhetssymbol	Betegnelse
$F \geq 49,03$	$\geq HV5$	Vickers hardhetsprøving
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 til $< HV5$	Vickers hardhetsprøving, lav belastning
$0,09807 \leq F < 49,03$	HV 0,01 til $< HV 0,2$	Vickers mikrohardhetsprøving

3 Tidligere testing

Utdrag fra testsertifikater finnes i vedlegg B.

3.1 Testmaterialer

De aktuelle materialene er normaliserte, lavlegerte karbonstål. Alle er sveiset med TIG, men med blant annet ulik tilsettkjemi og arbeidstemperatur. Se Figur 1.3 for skisse over materialene.

Tabell 3.1: Testmaterialenes egenskaper i levert tilstand.

Materialer	C-innhold	Testserie nr.	Tilsett	Forvarme [°C]	Dimensjon [mm]	Flytespenning [MPa]
Blindhub	0,16 %	1	A	100	D: 250	-
Rør	0,14 %	2	A	100	D: 323,9, t: 25,4	360
Stang	0,20 %	3a	B	200	D: 280, t: 30	381/374

Materialsertifikater for materialer og tilsett finnes i vedlegg A. Det er ikke lagt ved materialsertifikat for blindhub.

3.1.1 Testserie 1: Blindhub

På grunn av mistanke om feil kvalifiseringsgrunnlag av prosedyre som var brukt for reparasjonssveising av hubber i karbonstål, ble en tidligere sveisereparert blindhub hentet til land for testing. Som vi ser av Figur 3.1 ble blindhubben delt i to for å kunne fordeles mellom operatørs testsenter og Exova, et uavhengig testsenter. Målet med testingen var for å få bekreftet mistankene om at hardheten i tetteflaten ikke var i henhold til gitte krav for så å starte prosessen med kvalifisering av ny prosedyre.



Figur 3.1: Bildet viser en halv blindhub. Den ble delt i to slik at hver av delene kunne sendes til henholdsvis operatørs testsenter og Exova.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

3.1.1.1 Testing utført på operatørs testsenter

På operatørs testsenter ble det utført en kjemisk analyse på blindhubben, i sveisemetall og grunnmateriale. Tabell 3.2 viser den kjemiske sammensetningen i disse to sonene, samt karbonekvivalenten CE.

Tabell 3.2: Kjemisk sammensetning av sveisemetall og grunnmateriale for blindhub.

Område	CE	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu
Sveisemetall	0,48	0,16	0,59	1,31	0,025	0,028	0,15	0,64	0,38
Grunnmateriale	0,42	0,16	0,22	1,25	0,021	0,029	0,13	0,14	0,20

I tillegg til den kjemiske analysen, ble det tatt 15 Vickers hardhetsmålinger (HV) i sveisemetall, grovkornet HAZ og grunnmateriale. Her ble den høyeste verdien målt til 382 HV5, som ligger godt over det gitte hardhetskravet på maks 250 HV. Se vedlegg D.1 for utdrag fra standard. De høyeste hardhetsverdiene ble målt i sveisemetallet, men også i den grovkornede delen av varmpåvirket sone ble det målt verdier godt over krav. Tabell 3.3 under viser gjennomsnittsmålingene tatt i hver sone, samt minimums- og maks-verdier. I sveisemetallet er det en differanse mellom maks og minimum hardhet på hele 136 HV. Selv i grovkornet HAZ ligger differansen på over 100 HV.

Tabell 3.3 presenterer hardhetsverdiene fra tetteflatene på blindhub, som ble målt i sveisemetall, grovkornet varmpåvirket sone og grunnmaterialet. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 3.3: Hardhetsverdier målt på blindflens på operatørs testsenter.

Område	Hardhet (HV5)		
	Snitt (15 målinger)	Minimum verdi	Maksimum verdi
Sveisemetall	319	246	382
Grovkornet HAZ	274	213	321
Grunnmateriale	169	162	179

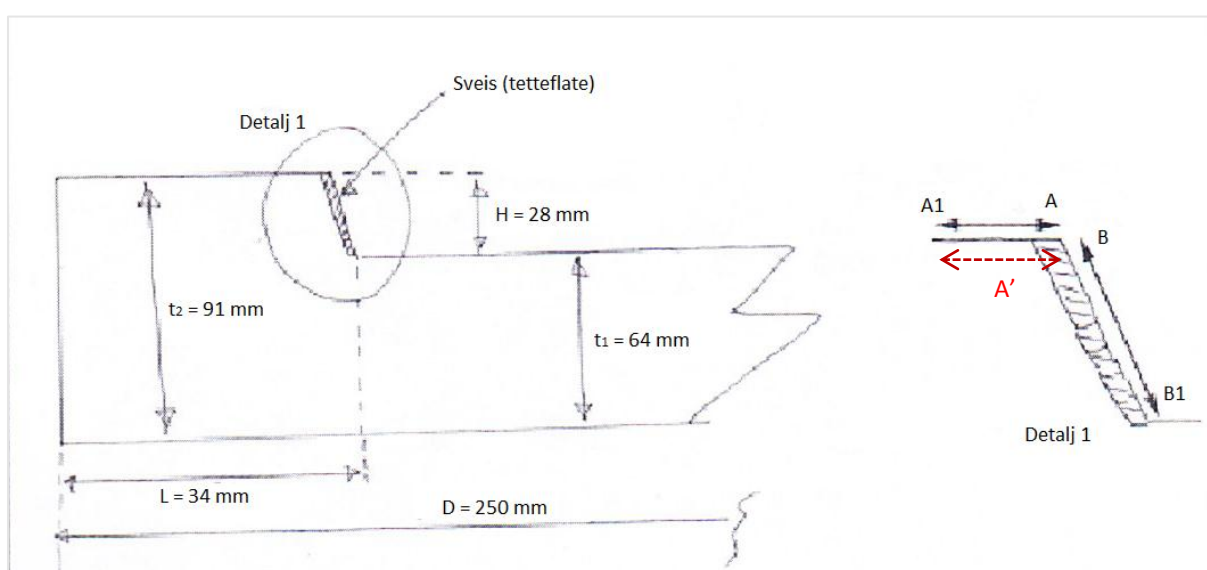
Mikrostruktur som ble observert var typiske herdestrukturer med innslag av martensitt i sveisemetall og grovkornet HAZ samt mikrostruktur bestående av ferritt og perlitt i grunnmateriale.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

3.1.1.2 Testing utført av Exova

På Exova ble ytterligere testing gjennomført på siste halvdel av blindhubben. Testingen var da i hovedsak hardhetstesting (HV10).

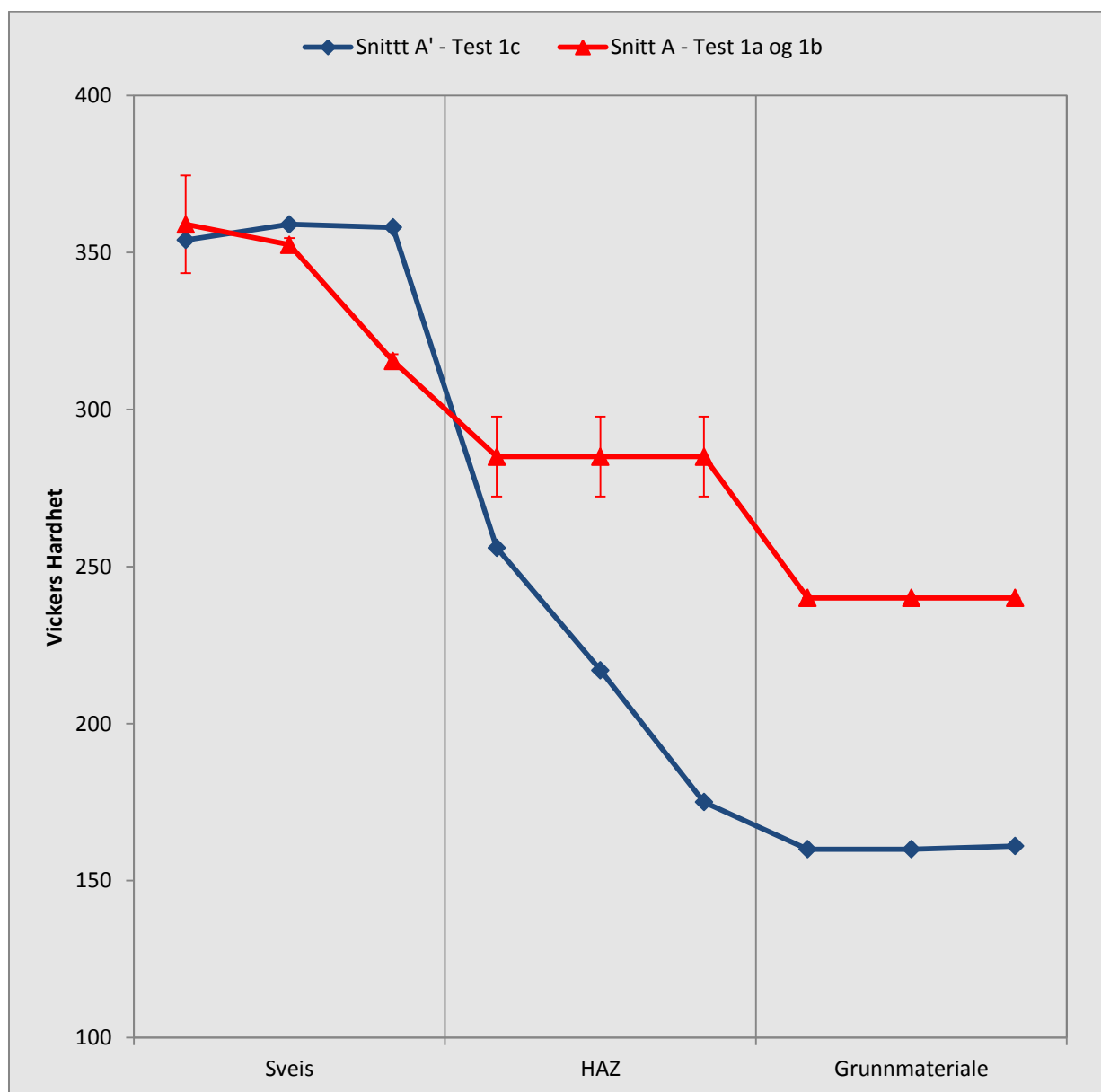
Det ble utført hardhetstesting i tre omganger, test 1a, b og c. For hver av testene 1a og 1b ble tatt hardhetsmålinger snitt A og B som vist på Figur 3.2 under. Snitt B var tatt i et snitt langsetter tetteflaten og et snitt på toppen av tetteflaten og ut mot flanken av blindhub, snitt A. Denne testingen ble gjort direkte på uslipt, materiale. Figur 3.2 under viser også blindhubbens dimensjoner samt et nytt, A'. Dette snittet er parallelt med snitt A, men er for målinger tatt på et slipt tverrsnitt. Snitt A' er markert med rød pil på samme figur.



Figur 3.2: Dimensjoner for blindhub og snitt A og B for hardhetsmålinger tatt på ubehandlet overflate. Rød piler markerer snitt A' som er for et slipt tverrsnitt.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

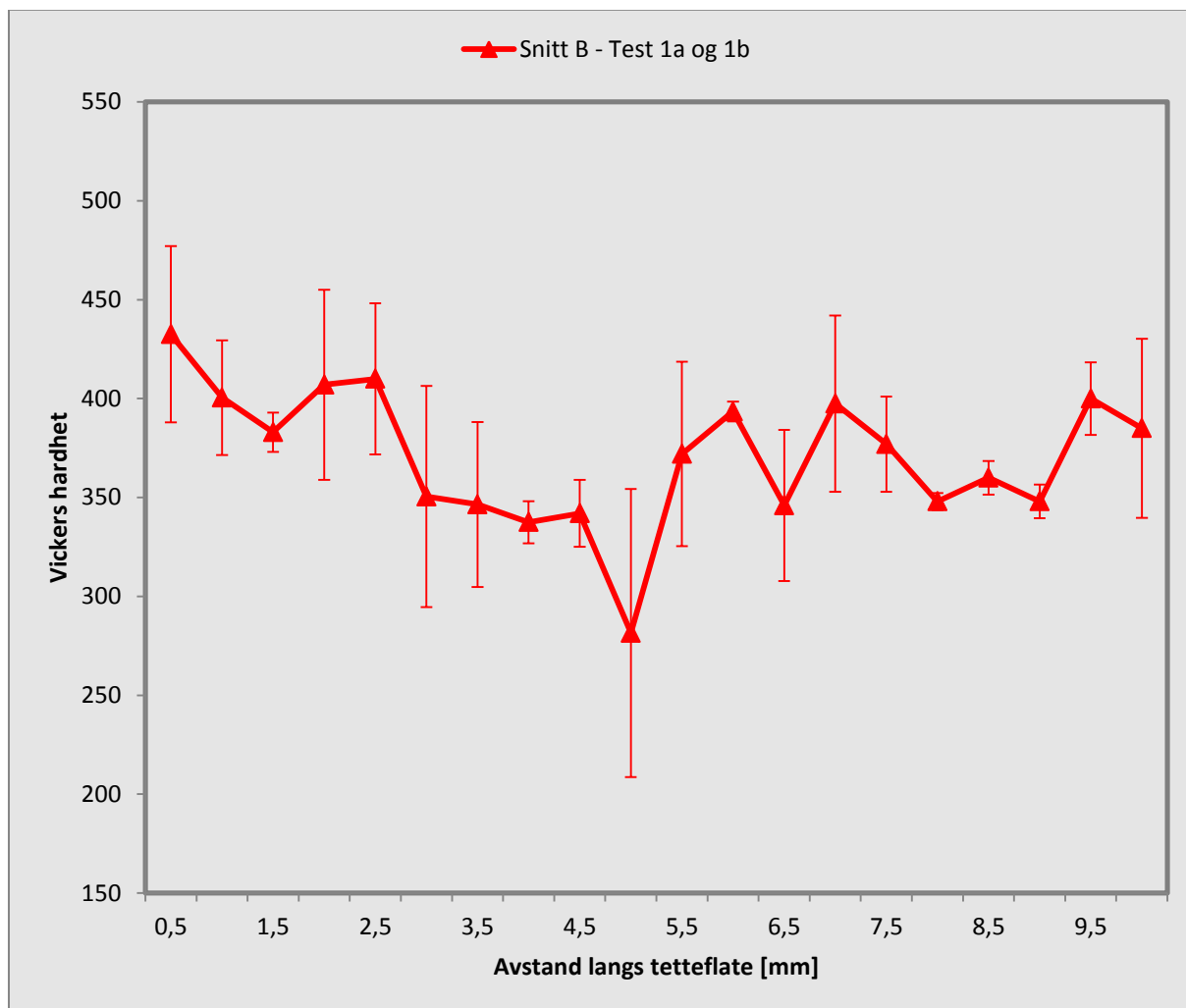
Figur 3.3 viser hardhetsdistribusjonen for hardhetsmålingene tatt på slipt og uslipt flate, gjennom sveis og ut i grunnmaterialet. Man ser tydelig forskjellen ved overgang til varmpåvirket sone. De to kurvene overlapper delvis hverandre øverst i sveisemetall. Årsaken til de høye hardhetsverdiene i HAZ og grunnmateriale er at de er tatt på en ubehandlet flate, som vil ha et herdet overflatesjikt. Det ble tatt kun en serie med målinger på det slipte tverrsnittet, derfor er det ikke knyttet noe standardavvik til kurven.



Figur 3.3: Hardhetsmålinger tatt på blindhub i snitt A for et slipt tverrsnitt og på ubehandlet flate med mulig herdesjikt.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

I snitt B ble det tatt hardhetsmålinger utenpå tetteflaten. Her ble den høyeste enkeltmålingen på 464 HV, noe som er nesten 100 % over krav. Allikevel må det bemerkes at her også er det tatt hardhetsmålinger uten å pusse ned det mekanisk herdede overflatesjiktet. Det ble tatt målinger med 0,5 mm avstand på tvers over tetteflaten. Figur 3.4 viser gjennomsnittlig hardhetsdistribusjon av tetteflaten, med tilhørende standardavvik.



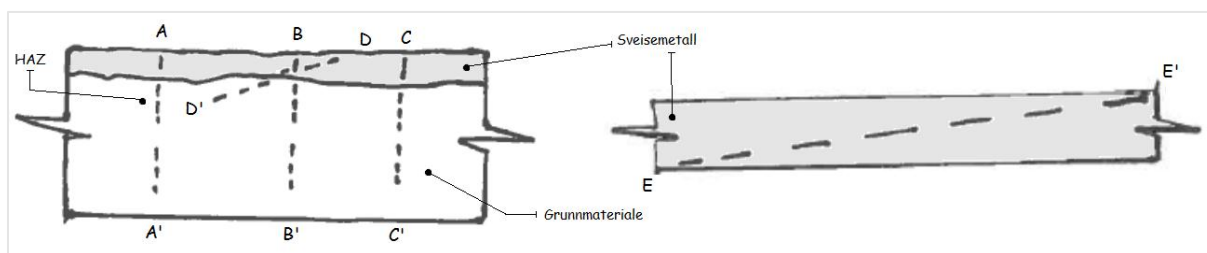
Figur 3.4: Hardhetsverdier tatt på den reparasjonssveisede tetteflaten på blindhub.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

3.1.2 Testserie 2: Rør

Denne testserien er fra en prosedyretesting som ble utført for å teste en sveiseprosedyre for reparasjonssveising, som hadde feil kvalifiseringsunderlag. Prosedyretestingen ble gjort på et rør med 0,14% karbon.

Hardhetsmålingene ble utført etter NS-EN ISO 15614-7. Det ble tatt hardhetsmålinger i fire snitt, A – D, gjennom sveiseforbindelsens tre soner. I tillegg ble det tatt hardhetsmålinger diagonalt gjennom sveisemetall. Snitt A – E vises på skissen i Figur 3.5.



Figur 3.5: Skisse som viser snitt A til E.

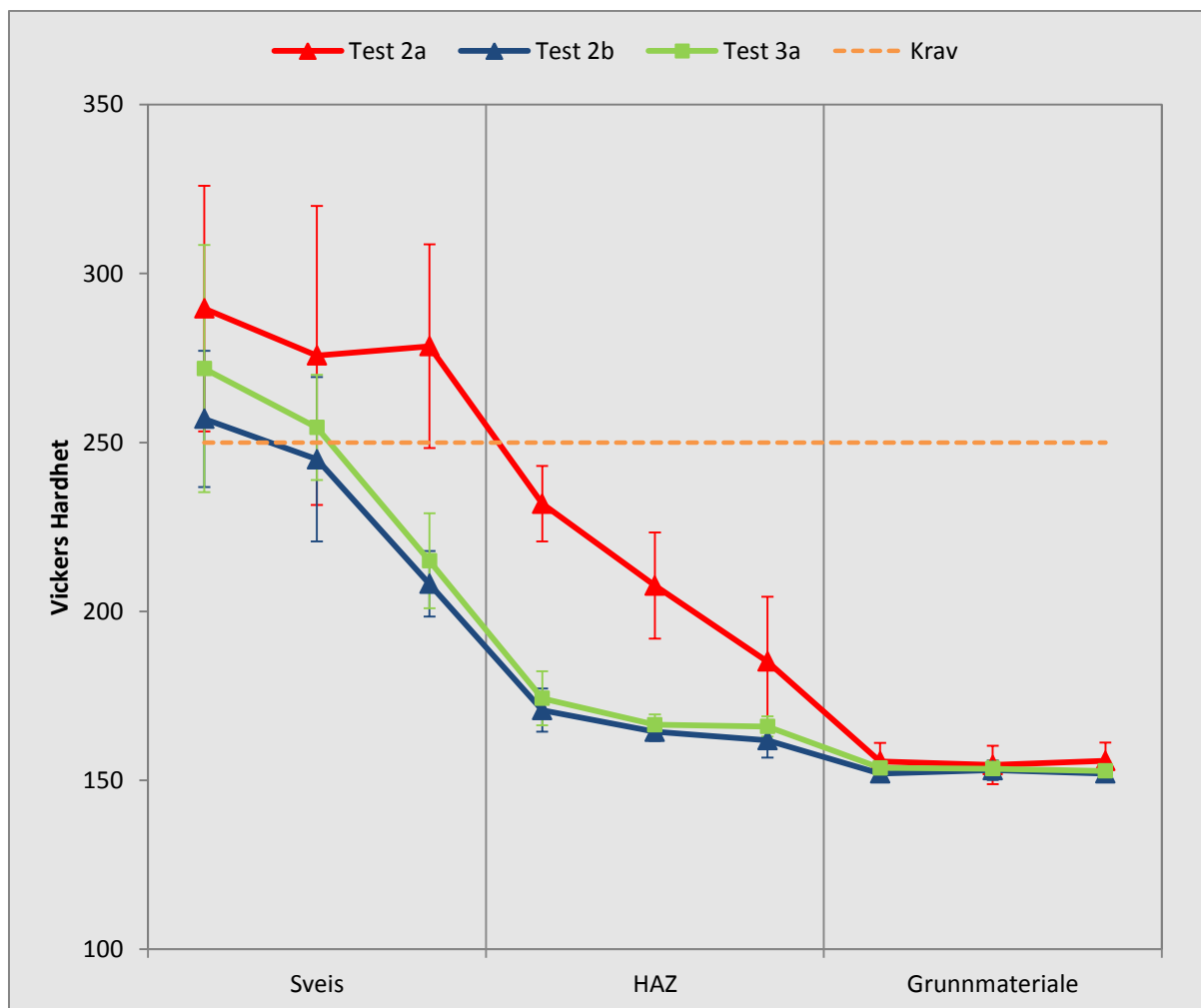
Tabell 3.4 viser oppsummert gjennomsnitt og maksverdier for de fire gjennomførte hardhetstestene. Årsaken til denne omfattende testingen, var på grunn av uforventede høye gjennomsnittsverdier i sveisemetallet. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 3.4: Maksimale hardhetsverdier funnet ved testing av produksjonstest

Test nr:	Målt maks HV10	Gjennomsnittlig målt HV10	Snitt	Antall serier per snitt
2a	354	281	A – D	2
2b	298	237	A – D	2
2c	360	247	A – D	4
2d	366	302	E	2

Figur 3.6 på neste side viser gjennomsnittskurver for hardhetsdistribusjonen til disse testene, med tilknyttet standardavvik.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 3.6: Gjennomsnitt av hardhetsmålinger knyttet til test 2a, b og c, med standardavvik

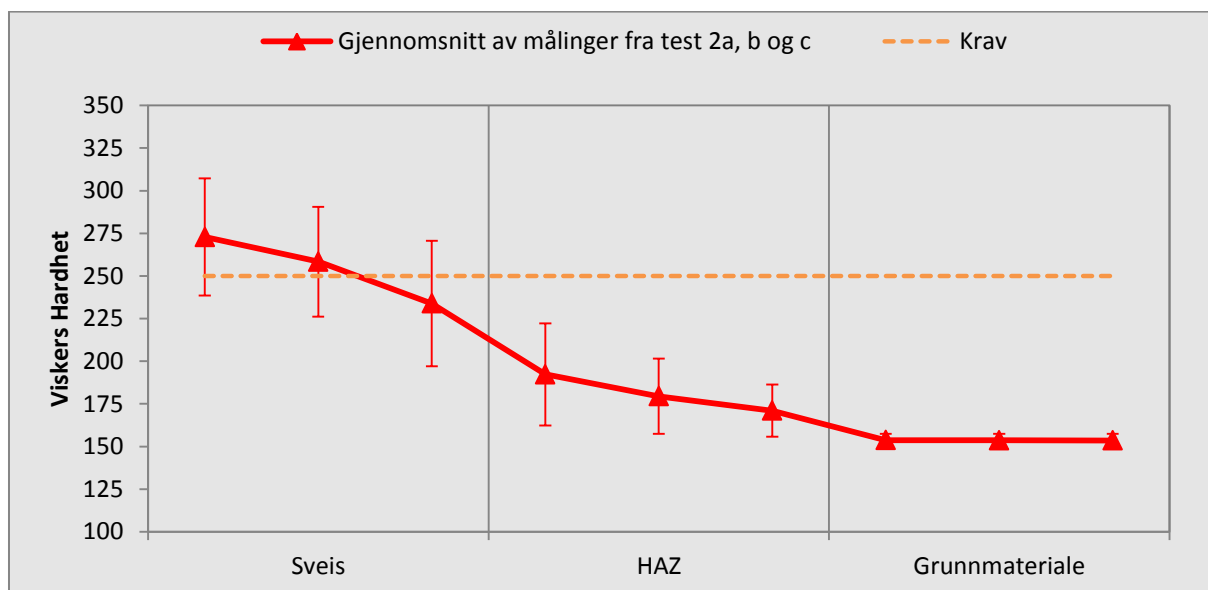
Vi kan se tydelig at fra Figur 3.6 at test 2a skiller seg mye fra de andre testene. I tillegg er det et relativt stort standardavvik knyttet til målingen utført i sveisemetallet, som tilsier en stor spredning i hardhetsverdiene. Tabell 3.5 viser de maksimale hardhetsverdiene målt ved hver test. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 3.5: Maksimale hardhetsverdier funnet i sveiseforbindelsens tre soner for test 2a, b og c

Maks målte Vickers hardhetsverdier			
Test nr	2a	2b	2c
Sveisemettall	354	298	360
HAZ	247	180	189
Grunnmateriale	168	157	158

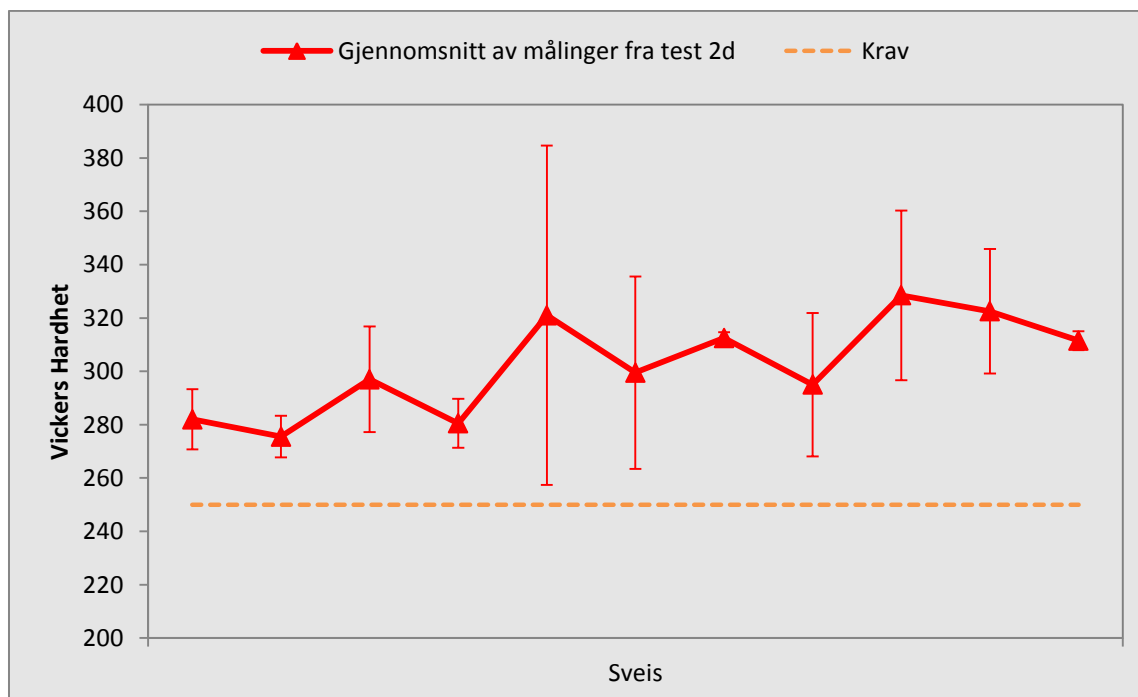
Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Figur 3.7 under viser en gjennomsnittskurve for test 2a, b og c, med standard avvik.



Figur 3.7: Gjennomsnittskurve for test 2a, b og c, med standardavvik

Fra de to forrige figurene ser man tydelig av det er i sveisemetallet problemet med for høy hardhet ligger. Derfor ble det tatt hardhetsmålinger kun i sveisemetallet, i snitt E. Figur 3.8 viser hardhetsfordelingen i sveisemetallet, med standardavvik. Man ser at hardhetsdistribusjonen varierer sykkelig, med en liten stigning. Man ser at selv innenfor standardavviket faller alle målingene over hardhetskravet.



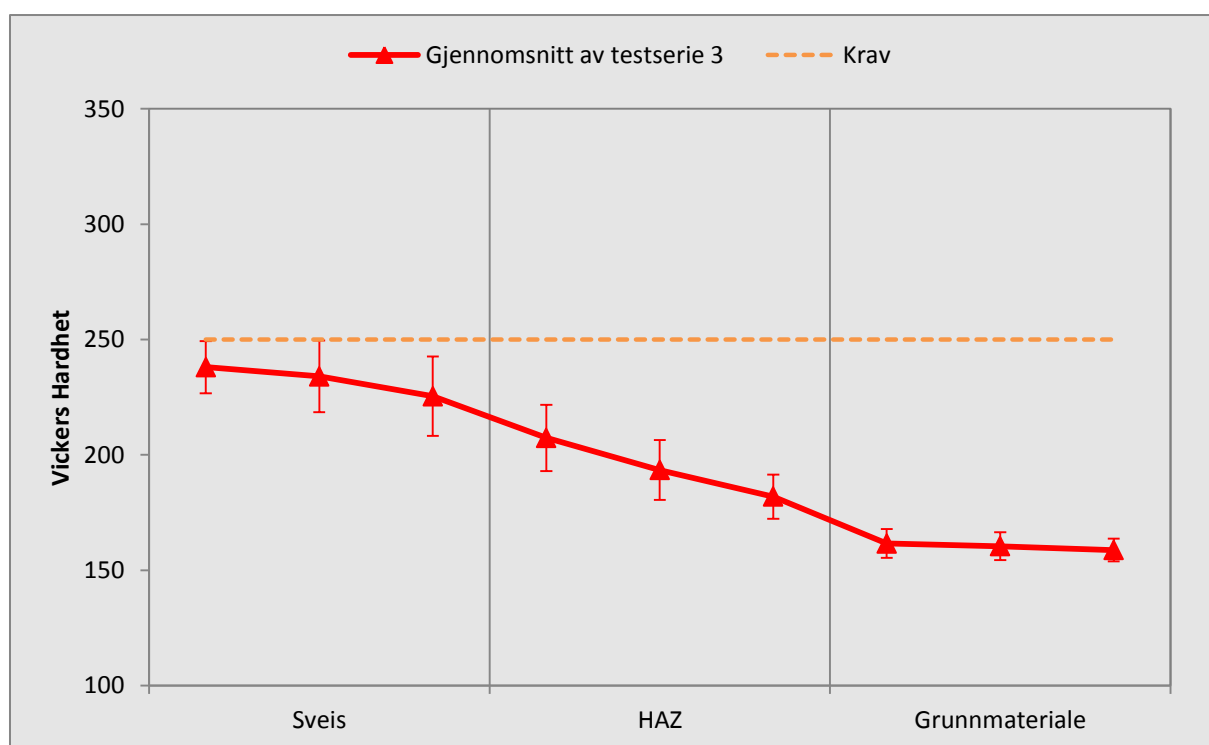
Figur 3.8: Test 3b med gjennomsnittlige hardhetsmålinger tatt i snitt E.

3.1.3 Testserie 3: Stang

Etter å ha testet den opprinnelige sveiseprosedyren for reparasjonssveising på et rør, og prosedyren ble forkastet, startet arbeidet med å kvalifisere en ny sveiseprosedyre.

Karboninnholdet på blindhub ble, under testing hos operatør, målt til 0,16 % C og røret i kapittel 3.1.2 har et karboninnhold på 0,14% C. For å få et grunnmateriale mer likt kemi i blindhub for videre testing, ble et stangmateriale valgt. Stangen har et karboninnhold på ca. 0,20 % C.

I tillegg til å bytte materiale ble sveisetilsettet byttet fra tilsett A til B samt forvarmingstemperaturen ble økt fra 100 °C til 200 °C. Varmetilførselen ble også økt. Med disse endringene implementert resulterte dette i en reduksjon av hardhetsverdiene sammenlignet med tidligere tester. Hardhetsverdiene ble målt til opp i mot 265 HV10 der ca. 17 % av målingene målt i sveis lå over krav. Dette ble sett på som tilstrekkelig for godkjenning av prosedyren.



Figur 3.9: Gjennomsnittlige hardhetsmålinger for testserie 3, med standardavvik.

Gjennomsnittlige hardhetsmålinger for testserie 3, med standardavvik. Figur 3.9 over viser gjennomsnittskurven knyttet til hardhetsmålinger tatt i sveiseforbindelsens tre soner. Tabell 3.6 under lister opp maksimalverdiene funnet i sveisemettall, HAZ og grunnmateriale. Røde tall er hardhetsverdier som overstiger krav til maks hardhet.

Tabell 3.6: Maksimale hardhetsverdier funnet i sveisemettall, HAZ og grunnmateriale.

Sone	Maks HV
Sveisemettall	265
HAZ	198
Grunnmateriale	172

3.2 Sveisetilsett

Kvalitetssertifikat for sveisetilsettene finnes i vedlegg. Det er sveisetilsett A og B som er mest verdt å merke seg, da testmaterialene gitt ved denne oppgaven er sveiset med disse.

3.2.1 Tilsett A

Denne type tilsett-materiale er brukt ved testserie 1 (blindhub) og 2 (rør).

Sveisetilsettet brukes ved TIG-sveising på lavlegert, værbestandig stål. (ESAB, 2011)

Tabell 3.7: Typisk kjemisk sammensetning for tilsett A

%C	%Si	%Mn	%Ni	%Cu
0,1	0,8	1,3	0,8	0,3

Mekaniske egenskaper av sveis (ESAB, 2011):

- Flytegrense: 480 MPa
- Bruddgrense: 580 MPa
- % forlengelse: 30
- Slagseighet ved:
 - +20 °C: 110 J
 - -20 °C: 70 J
 - -40 °C: 60 J

3.2.2 Tilsett B

Denne type tilsett er brukt ved testserie 3, stang.

Dette er et sveisetilsett brukt ved TIG-sveising av ulegerte og lav-legerte stål. Det lave innholdet av silisium gjør sveiestaven spesielt egnet for sveiser som senere skal lakkeres eller galvaniseres. Tilsettet er også godt egnet til bruk i sure gassmiljøer (sur service). Grunnmaterialer med en flytegrense på opptil 460 MPa kan brukes, som blant annet inkluderer rør og stang som er presentert i kapittel 3.1. Anbefalt dekk-gass er Argon 4,6. (Böhler, 2008)

Tabell 3.8: Typisk kjemisk sammensetning for tilsett B.

%C	%Si	%Mn
0,1	0,6	1,2

Sveisens mekaniske egenskaper:

- Flytegrense: 500 MPa
- Strekkfasthet: 600 MPa
- % forlengelse: 26
- Slagseighet ved – 50 grader (Charpy V-Notch): ≥ 47 J

(Böhler, 2008)

4 Eksperimentelt

4.1 Utstyr

4.1.1 Skjæring

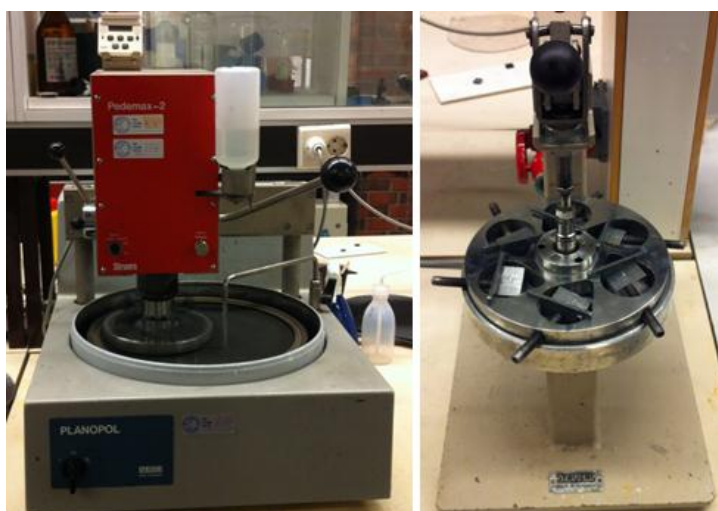
Materialene som ble gitt av kontraktør var rester fra deres egne testinger på et tredjeparts testsenter. Disse materialene ble levert i større biter og måtte først grovkuttes for så å dele de opp til mindre prøvestykker, også kalt makroer. Til grovkuttingen ble en sag av merket Rusch, type HBS 260, brukt. For å kutte stålbitene i mindre og mer anvendelige biter ble det brukt en kuttemaskin av merket Struers og type Discotom-5. Se bilder i Figur 4.1 under.



Figur 4.1: Maskiner som ble brukt til grovkutting (venstre bilde) og finkutting (høyre bilde) av prøvebiter

4.1.2 Sliping og polering

For å kunne slippe og polere flere stykker på en gang, ble det brukt en automatisert Struers Planopol slipemaskin. Maskinen består av en roterende magnetisk plate der slipepapir av ulik grovhet festes til en selvklebende rund stålplate. Polerplater i metall brukes for polering og festes lett på den roterende skiva. Festet på pussemaskinen (rød boks på bildet under) er Pedemax-2 som sammen med en prøveholder i rustfritt stål (bildet til høyre under) brukes til å rotere prøvebitene på pusseplata for et jevnt resultat.



Figur 4.2: Slipemaskin og prøveholder for jevn sliping og polering av prøvebiter.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.1.3 Varmebehandling av sveis

For noen av prøvestykkene ble det utført en spenningsgløding, for å se effekten den har på hardheten i sveisemetallet. Til dette arbeidet ble det brukt en programmerbar ovn av typen Nabertherm Controller B 180.



Figur 4.3: Ovn brukt ved spenningsgløding av utvalgte prøvestykker.

4.1.4 Stereolupe

Stereolupe ble brukt for å ta bilder av sveiseforbindelsen på makroene i full størrelse. Det er av typen Leica MZ 12,5 og er koblet til en stasjonær PC for lagring og redigering av bilder.

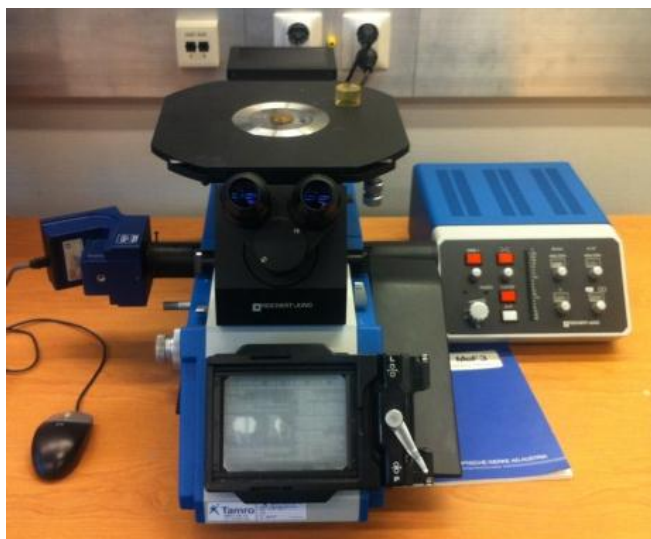


Figur 4.4: Stereolupe av typen Leica MZ 12,5.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.1.5 Metallmikroskop

Etter sliping, polering og etsing av prøvebiter, ble det brukt et metallmikroskop for vurdering av mikrostruktur. Mikroskopet av typen Reichert-Jung MeF3 var koblet til en datamaskin slik at bildene kunne lagres og analyseres. Lysmikroskopet har mulig forstørrelse på x2 til x100.



Figur 4.5: Metallmikroskop av typen Reichert-Jung MeF3.

4.1.6 Vickers mikrohardhetsmåler

Til måling av hardhet ble det brukt en Vickers mikrohardhetsmåler av typen Matsuzawa DHM-1. Det aktuelle apparatet brukt i oppgaven er en mikrohardhetsmåler som har en last på 10g til 1kg.



Figur 4.6: Vickers mikrohardhetsmåler

4.2 Fremgangsmåte

4.2.1 Bearbeiding av prøvestykker

4.2.1.1 Kutting

Stangmateriale er skjært opp i tre strimler hver hvorav en ble kuttet opp i 10 mindre biter. Fra blindflensen ble det kuttet opp to kakestykker som ble beskåret til en passende mindre størrelse. Skarpe kanter ble slipt på pussebånd. Bitene ble gitt bokstaver og tall for å skille dem fra hverandre.

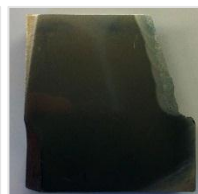
Tabell 4.1: System for identifikasjon av de ulike prøvebitene.

Prøveidentifikasjon	Prøvenavn
A1 – A10, B1 – B10	Stang
C1, C2	Blindflens
D1 – D10, E1 – E10	Rør

Bitene A og D er fra materialer fra horisontal sveiseposisjon, mens B og E er fra vertikal sveiseposisjon. Se bildene under for geometri på prøvestykkene. Bildene er av ferdig etsede makroer.



Figur 4.7: Oppdeling av makroene A, B, D og E. Bildet viser A1 – A10.



Figur 4.8: Makro C

4.2.1.2 Pussing og polering

Alle bitene ble pusset med samme type smergelpapir. De minste bitene passet i en sliperigg som tok seks prøver om gangen. C1 og C2 ble slipt og polert for hånd fordi bitene var for store for slipeformen, smergelpapiret er nummerert etter FEPA-standard. (Federation of European Producers of Abrasives, 2012)

Tabell 4.2: Smergelpapir brukt for sliping av prøvebiter

Silikonkarbid smergelpapir	Gjennomsnittlig partikkelstørrelse [μm]	Spredning av partikkelstørrelser [μm]
P80	196	355 – 150
P120	120	212 – 90
P180	75	150 – 63
P220	65	125 – 53
P320	46	94 – 34
P500	31	77 – 21
P1000	18	63 – 12
P1200	15	58 – 10

(Petzow & Carle, 1999) s. 23

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Polering av prøvebitene ble utført med poleringsmatter og diamantspray som vises i tabellen under.

Tabell 4.3: Oversikt over brukte poleringsprayer og poleringsmatter

Monokrystallin diamantspray - korndiameter	Struers Poleringsmatte
6 µm	MD Dur
3 µm	MD Mol
1 µm	MD Nap

4.2.1.3 Etsing

Etsing av prøvebitene ble utført med en løsning av etanol og 2 % salpetersyre; også kjent som Nital 2%. Denne type etsing, etser bort korngrenser og gir et bra utgangspunkt for undersøkelse av mikrostruktur i lysmikroskopet.

Tabell 4.4: Innholdet i Nitalløsningen som ble brukt til etsing av makroer

Kjemikalie	Navn	Mål
HNO ₃	Salpetersyre	4 ml
CH ₃ CH ₂ OH	Etanol	196 ml

Alle makroene ble etset i 15-20 sekunder, deretter skyllet med vann og vasket med bomull for så å blir skyllet med alkohol og tørket med trykkluft.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.2.2 Teoretisk beregning av Vickers hardhet i sveisemetall

Ved utarbeiding av sveiseprosedyrer på karbonstål, bruker kontraktør formler for å beregne maksimal Vickers hardhet (HV10) og avkjølingshastighet ($\Delta t_{8/5}$). Basert på disse formlene har kontraktør laget et regneark for raskt og nøyaktig å kunne vurdere flere typer kjemi ved utarbeiding av sveiseprosedyrer, se Figur 4.9 under.

Materialteknologi										
Beregning, CE / Pcm og Hardhetsnivå, Karbonstål.										
KJEMI :										
C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	CE :	Pcm:
0,104	0,57	1,14	0,02	0,01	0,04	0	0,004	0	0,305	0,184
SVEISEPARAMETRE :										
Platetykkelse:	26	mm	Temp før sveising:	75	°C					
Virkningsgrad:	0,6		Varmetilførsel:	1,9	Kj/mm					
Avk.hast. 800/500:	7,02									
HV10 maks :	261									
										Virkningsgrad:
										MMA : 0,8
										TIG : 0,3 - 0,6
										SAW : 0,95 - 1
										MIG : 0,8

Figur 4.9: Skjermbilde av regneark som blir brukt av Kontraktør for å beregne maksimal Vickers hardhet og avkjølingshastighet.

Den teoretisk beregnede hardheten er avhengig av %C, avkjølingshastighet $\Delta t_{8/5}$ samt karbonekvivalenten P_{cm} . Beregnet avkjølingshastighet er avhengig av om tykkelsen er større eller mindre enn 23mm, men også av arbeidstemperatur, virkningsgrad og varmetilførsel under sveising.

Formlene for avkjølingshastigheten, $\Delta t_{8/5}$, og $HV10_{maks}$ vises under: (Med %C menes det vekt% C)

$$\Delta t_{8/5} = (1340 - T_0) \cdot 5 \cdot \eta \cdot Q \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right], \quad (t \geq 23mm)$$

$$\Delta t_{8/5} = (1000 - T_0) \cdot 430\,000 \cdot \left(\frac{\eta \cdot Q}{t} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right], \quad (t \leq 23mm)$$

$$HV10_{maks} = 189 + 67 \cdot \%C + 507 \cdot P_{cm} - (101 + 711 \cdot \%C - 461 \cdot P_{cm}) \cdot \tanh \left[\frac{\log_{10}(\Delta t_{8/5}) + 0,501 + 7,9 \cdot \%C - 11,01 \cdot P_{cm}}{0,543 + 0,55 \cdot \%C - 0,76 \cdot P_{cm}} \right]$$

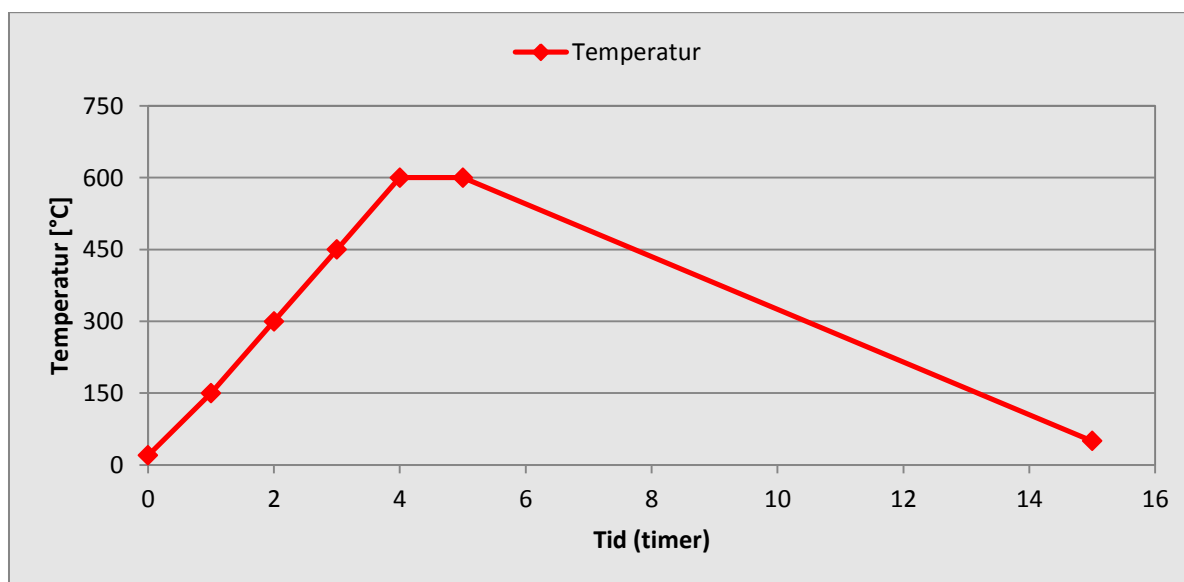
- η : Virkningsgrad for sveisemetode [-]
- Q : Varmetilførsel [kJ/mm]
- T_0 : Arbeidstemperatur [°C]
- t : Godstykkelse [mm]
- $\Delta t_{8/5}$: Avkjølingshastighet fra 800 °C til 500 °C [s]

Fra formlene for avkjølingshastighet gitt i kapittel 2.2.1, har karbonstålets varmeledningsevne (λ), tetthet (ρ) og spesifike varme (C_p) blitt lagt direkte inn i formlene over.

4.2.3 Spenningsgløding av prøvestykker

En prøvebit tatt fra blindflensen (C2) og prøvebiter fra produksjonstesten (D4, D7, E4 og E7) ble varmebehandlet, også kalt spenningsgløding. Prøvebitene ble valgt ut da de hadde den høyeste hardheten med innslag av martensitt under tidligere testing. Med en spenningsgløding skal da hardheten synke betraktelig.

Prosedyren for varmebehandling ble gjort etter tabell fra standard ASME B31.3 (Se vedlegg D.2). Det ble gitt en oppvarmingstid på 150 °C per time, i fire timer. Ved 600 °C ble det brukt en holdetid på en time. Etter en time ble ovnen skrudd av, døren ble åpnet litt for å starte avkjølingsprosessen og bitene ble liggende å kjøle seg ned over natten. Se figur under for tid-temperaturdiagram. Fra time 5 til 15 vises det er rett linje med negativt stigningstall. Dette er kun en approksimasjon av avkjølingsforløpet.



Figur 4.10: Tid-Temperatur-diagram for ettervarmingen av prøvestykker. Grafen viser temperaturforløpet i varmeovn.

Etter varmebehandlingen ble alle bitene slipt og polert på nytt. Det ble startet med et slipepapir av typen P500 og videre med samme prosedyre videre som gitt i kapittel 4.2.1.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.2.4 Metallmikroskop

Metallmikroskopet har blitt brukt hyppig for vurdering av mikrostruktur i ulike områder og for sammenligning av de forskjellige sveiseprosedyrene.

4.2.5 Vickers mikro hardhetsmåling

Ved hardhetstesting ble det kun foretatt mikrohardhetsmålinger. Det ble brukt 50 gram trykk med 10 sekunders holdetid. Testingen ble utført med to forskjellige metoder.:

- Test x.1: Måleserier tatt kun i sveisemetall
- Test x.2: Måleserier tatt fra sveisemetall og inn gjennom varmepåvirket sone til upåvirket grunnmateriale.

Men x menes det testserie nr. (1: Blindhub, 2: Rør, 3: Stang)

4.2.5.1 Testserie 1: Blindhub (C-prøver)

Test 1.1:

For hver prøvebit ble det tatt én måleserie i sveisemetallet, 0,5 mm fra sveiseoverflaten, med 1 mm avstand mellom inntrykkene. Det ble tatt 16 inntrykk på hver prøvebit. (Se tabell under.)

Test 1.2:

Hardhetsmålinger ble også tatt gjennom sveisemetall, HAZ og grunnmateriale. Inntrykkene ble tatt 0,5 mm fra sveiseoverflaten og med 1 mm avstand. Det ble tatt 11 inntrykk på hver prøvebit. (Se tabell under)

Tabell 4.5: Hardhetstesting 1.1 og 1.2 på blindhub.

Makro nr	Test 1	Test 2	Spenningsglødet
C1	X	X	
C2	X	X	X

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.2.5.2 Testserie 2: Rør (D- og E-makroer)

Test 2.1:

Det ble tatt måleserier kun i sveisemetallet, 1,5 mm fra sveiseoverflaten, med 1 mm avstand mellom inntrykkene. Dette ble gjort for å sjekke hardhetsvariasjoner i sveisemetallet og for å finne en gjennomsnittsverdi med tilhørende usikkerhet. Det ble tatt én måleserie med 15 inntrykk per prøvebit. (Se tabell under.)

Test 2.2:

Det ble det også tatt serier med hardhetsmålinger gjennom sveisemetall, HAZ og grunnmateriale. Dette ble utført ved å starte inntrykkene 0,5 mm fra sveiseoverflaten og fortsette med 1 mm avstand. Det ble tatt en måleserie med 9 inntrykk på hver prøvebit, med unntak av to prøvebiter der det ble tatt to måleserier. (Se tabell under)

Tabell 4.6: Hardhetstesting 2.1 og 2.2 på rør.

Makro nr	Test 1	Test 2	Spenningsglødet
D2	X	X	
D3	X		
D4*	X	X	X
D5	X	X	
D6	X	X	
D7*	X	X	X
D8	X		
D9	X	X	
E4	X		X
E7	X		X

*for Test 2.2 ble det tatt to parallelle måleserier per bit.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

4.2.5.3 Testserie 3: Stang (A- og B- prøver)

Test 3.1:

Det ble tatt måleserier kun i sveisemetallet, 1,5 mm fra sveiseoverflaten, med 1 mm avstand mellom inntrykkene. Det ble tatt én måleserie med 16 inntrykk per prøvebit. (Se tabell under.)

Test 3.2:

Det ble tatt hardhetsmålinger gjennom sveisemetall, HAZ og grunnmateriale. Inntrykkene ble startet 0,5 mm fra sveiseoverflaten, med 1 mm avstand mellom inntrykkene. Det ble tatt to måleserier med 11 inntrykk på hver prøvebit. (Se tabell under)

Tabell 4.7: Hardhetstesting 3.1 og 3.2 på stang.

Makro nr	Test 1	Test 2	Spenningsglødet
A5	X	X	
A6	X	X	
B5	X		
B6	X		

4.2.5.4 Usikkerhet knyttet til måleresultatene

Til alle seriene med hardhetsmålinger ble det beregnet standardavvik (s) for hvert målepunkt (x), knyttet til gjennomsnittet av hardhetsmålingene.

I tillegg ble det tatt 10 hardhetsmålinger på en referanseblokk, med en fast hardhet på 700HV, for å finne usikkerheten ($\delta_{ref.}$) knyttet til avlesing av Vickers-diagonalene (d_1 og d_2). Resultatet fra kalibreringsmålingene gav et standardavvik på 7,6 HV. Det vil si at målenøyaktigheten knyttet til avlesing av hardhetsverdier var på $\pm 7,6$ HV.

Samlet usikkerhet for hardhetsmålingene, δ , blir da:

$$\delta = \sqrt{s^2 + (\delta_{ref.})^2}, \quad \text{der } s = 7,6 \text{ HV}$$

som gir $x = (\bar{x} \pm \delta)$

Beregning av standardavvik ble gjort i Microsoft Excel med funksjonen STD.S(). Denne funksjonen brukes når man har et utvalg av målinger, der målingene er stikkprøver fra en større populasjon. STD.S() bruker følgende formel for standardavvik:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(N - 1)}}$$

der x representerer målingene (x_1, \dots, x_n) med utvalgsgjennomsnittet \bar{x} . N er antall målinger i utvalget. (Microsoft.com, 2012)

5 Resultat

I arbeidet rundt oppgavens problemstilling har det blitt brukt forskjellige metoder for analyse av materialene som er gitt av kontraktør. Metodene som har blitt brukt er Vickers metoder for mikrohardhetsmåling, formler for å beregne teoretisk maksimal hardhet og avkjølingshastighet i sveiseforbindelsen, samt forskjellige typer mikroskopi for vurdering av mikrostruktur. Resultatene skal hjelpe til ved utvikling av nye sveiseprosedyrer på karbonstål som gir tilfredsstillende hardhet i sveiseområdet i henhold til krav som stilles ved sur service. Metoder og fremgangsmåte for Vickers hardhetstesting er presentert i kapittel 4.2.5.

Kontraktør sveiset opp to nye prosedyrer på stang for testing i forbindelse med denne oppgaven. Disse materialene er sveiset på bakgrunn av tidligere presenterte sveiseprosedyrer knyttet til testserie 2 og 3, men med noen små endringer i utvalgte parametere. Tidspunktet for levering av disse sistnevnte materialer var tett opp mot denne oppgavens tidsfrist, så de ble sendt til testing på Exova på oppdrag fra operatør. Disse nye resultatene fra hardhetstesting på Exova er presentert i dette kapitlet. Tabell 5.1 under viser materialene fra testserie 1, 2 og 3a, som skal testes videre i denne oppgaven, samt de to siste testseriene fra Exova.

Tabell 5.1: Materialer fra kontraktør som har blitt testet i forbindelse med denne oppgaven.

Materiale	Testserie	Sveisemetode	Forvarme	Tilsett
Blindhub	1	TIG	100	A
Rør	2	TIG	100	A
Stang	3a	TIG	200	B
Stang	3b (basert på 2)	TIG	200	A
Stang	3c (basert på 3a)	TIG	75	B

I tillegg til mekanisk testing for å finne hardhetsdistribusjonen i testmaterialene, har det blitt utført beregninger av teoretisk maksimal hardhet av sveisemetall. Dette har blitt gjort for sveisetilsett A og B for parametere knyttet til testserie 2 og 3a – c. (Se kapittel 3.2 for generell informasjon om tilsett A og B).

For å få oversikt over mikrostrukturen i de forskjellige sveisede materialene, har det blitt benyttet forskjellige typer mikroskopi. Metallmikroskop har blitt brukt mest aktivt, men stereolupe har også blitt brukt ved mindre forstørrelser.

Det har også blitt gjennomført en spenningsgløding av utvalgte prøvestykker. Dette har blitt utført for å sjekke hvilken grad av hardhetsreduksjon dette har på prøvestykkene (Se kapittel 2.6.4.3 for teori).

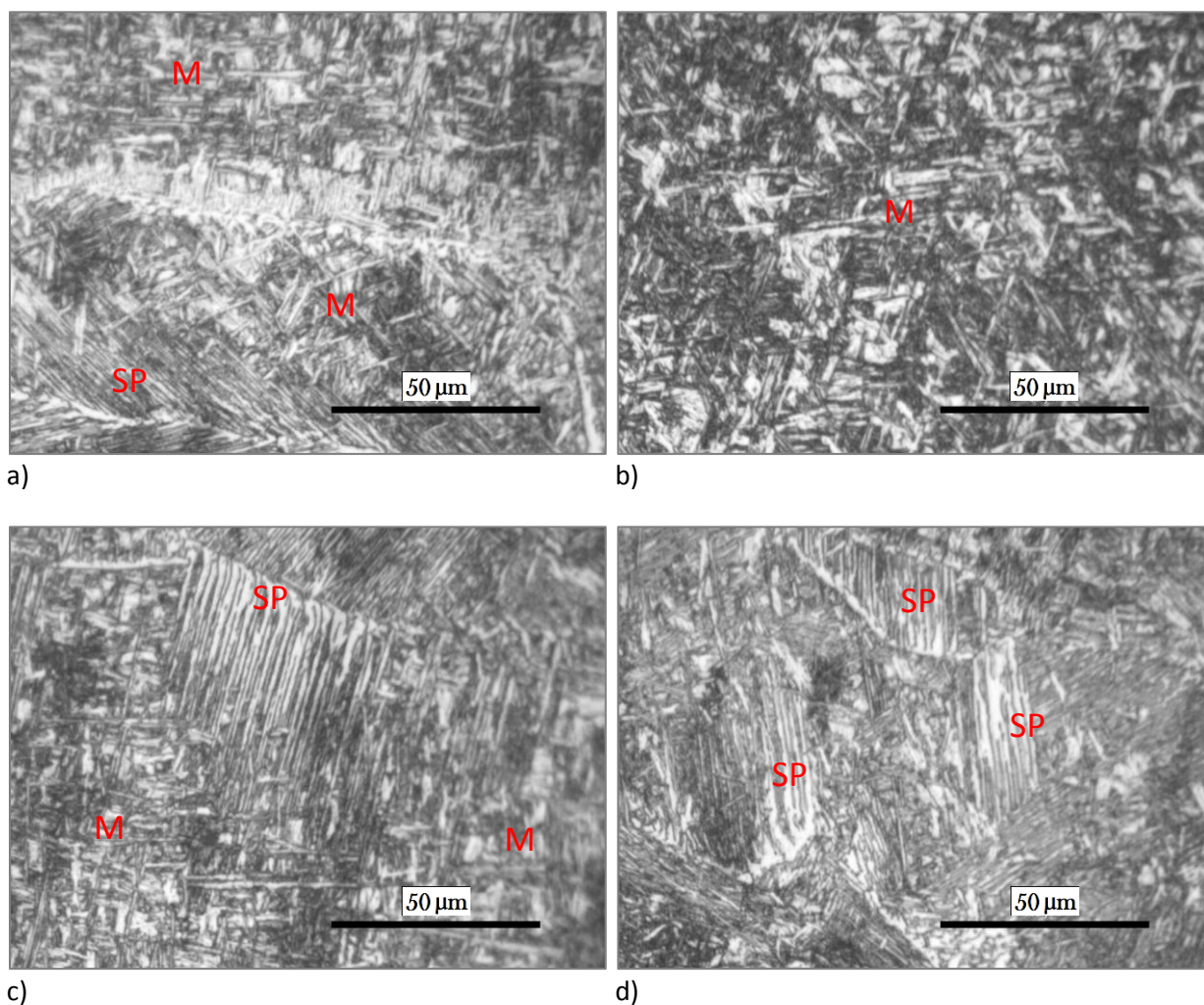
Identifisering av mikrostruktur har stort sett blitt gjort på bakgrunn av visuelle betraktninger i mikroskop, men hardhetsverdier og distribusjon har også spillet en viktig rolle.

Der det i dette kapitlet henvises til hardhetsmåling, menes det mikrohardhetsmåling.

5.1 Testserie 1: Blindhub

5.1.1 Test 1.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall

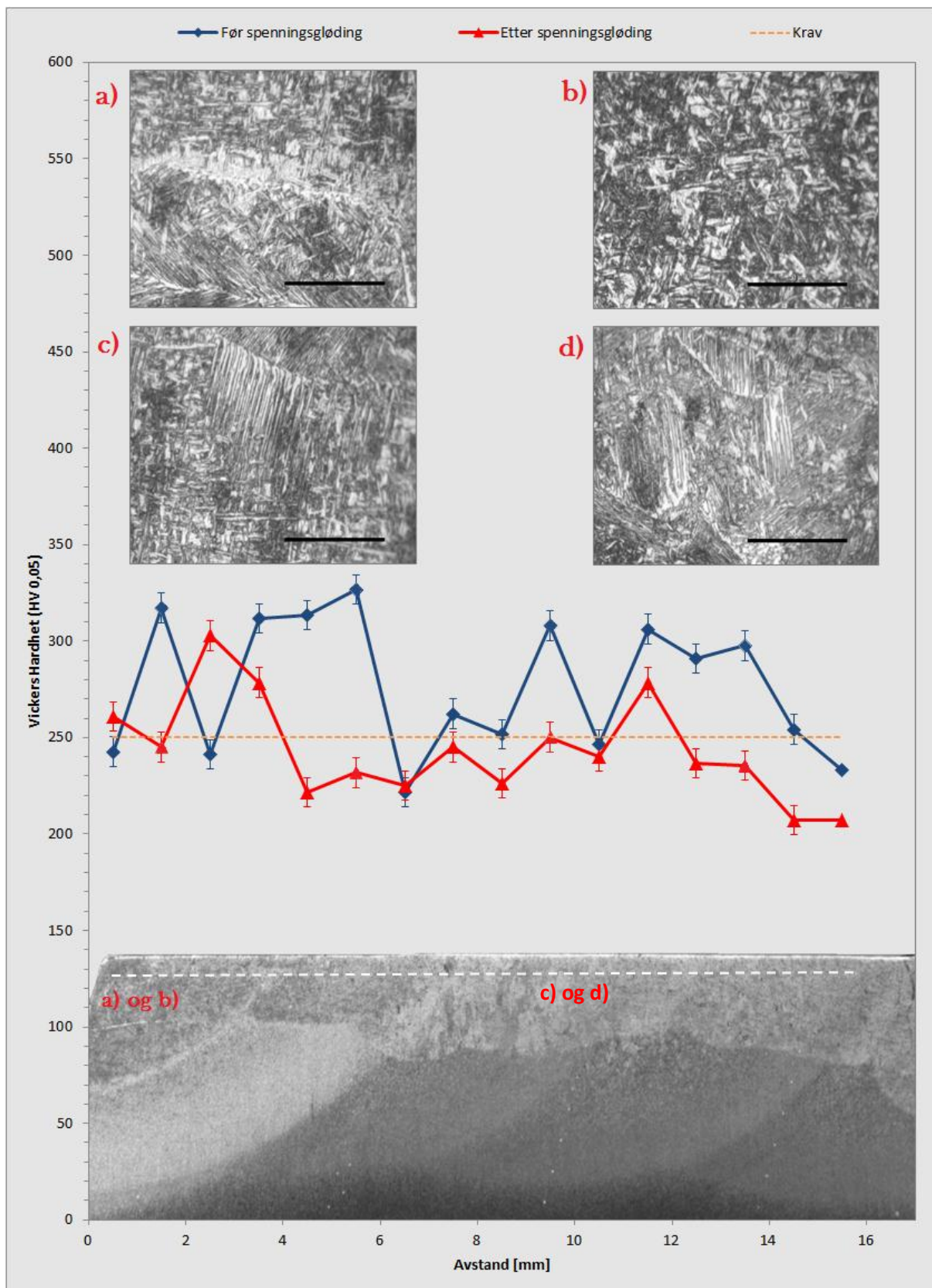
Bildene på Figur 5.1 a) til d) under, viser et utdrag fra bildene tatt med metallmikroskop i øverste lag av sveisemetallet på blindhub. Mikrostrukturen er preget av mye martensitt sammen med grove lange nåler av sideplateferritt (SP).



Figur 5.1: Bilde a) og b) viser en mikrostruktur preget av mye martensitt (M). Bildene er tatt i sveisemetallet for øverste og siste sveisestreg på tetteflaten. Her har avkjølingshastigheten vært svært rask. Bilde c) og d) viser en mikrostruktur bestående av stort sett av sideplateferritt (SP) og martensitt (M). Disse bildene er også fra sveisemetallets øverste lag, men mer sentralt på tetteplaten.

Det ble tatt hardhetsmålinger på to makroer fra blindhub, derav en som hadde gjennomgått spenningsgløding. Målingene ble tatt på tvers av laget med sveisemetall, på grunn av at tidligere testing hadde påvist svært høye hardhetsverdier. Figur 5.2 på neste side viser hardhetsdistribusjonen av målinger tatt i sveisemetall, med en avstand mellom inntrykkene på ca. 1 mm. Den hvite stiplede linjen viser hvor i sveisemetallet hardhetsmålingene ble tatt. Det ble tatt en måleserie på hver prøve, derfor er det ikke knyttet noe standardavvik til målingene. Usikkerheten til målingene er kun knyttet til min målenøyaktighet (se kapittel 0), som ligger på $\pm 7,6$ HV per punkt.

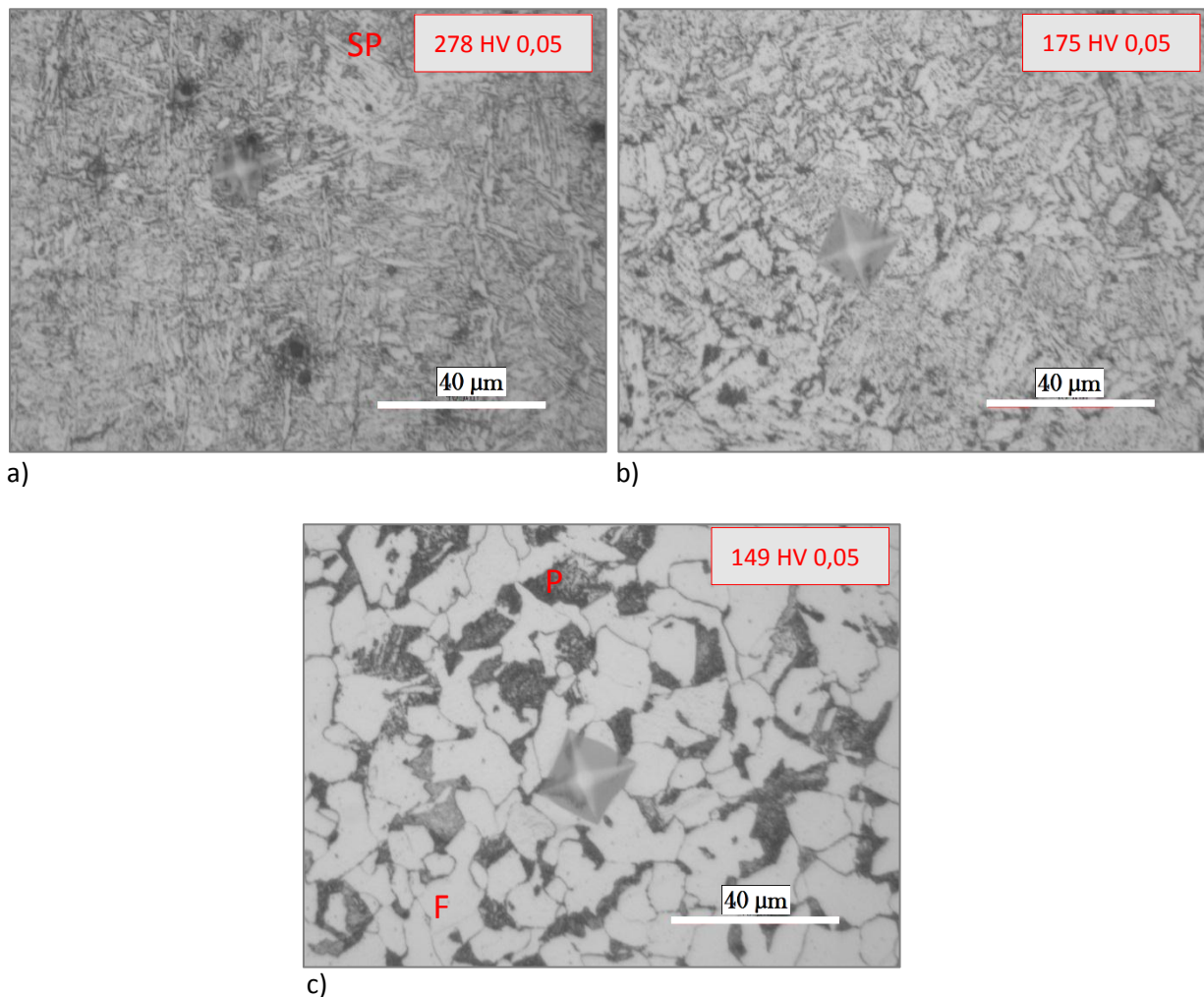
Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.2: Målinger tatt i sveisemetallet til tetteflaten, før og etter spenningsgløding. Bildene a) og b) er tatt fra området som er markert i sveisen, mens c) og d) er tatt i sveisemetallet mer midt på tetteflaten nær den stiplede hvite linjen.

5.1.2 Test 1.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen

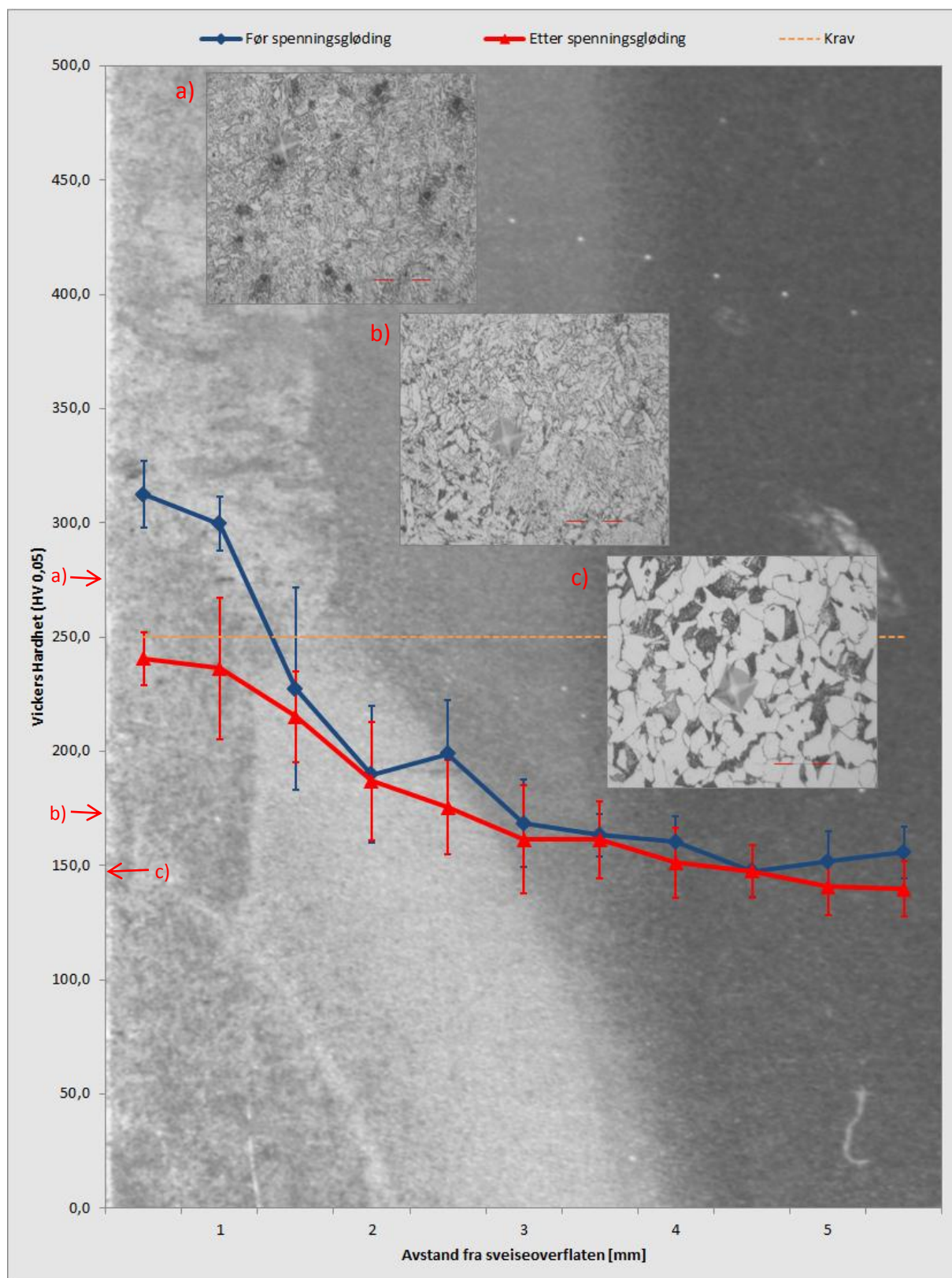
Det ble tatt hardhetsmålinger på makroer med og uten spenningsgløding. Målingene ble tatt innover gjennom sveisemetall, varmpåvirket sone og til og med upåvirket grunnmateriale. Det ble tatt målinger med 1 mm mellomrom innover i metallet, fra 0,5 mm fra sveiseoverflaten. Bildene på Figur 5.3 under viser bilde av typisk mikrostruktur som finnes i sveisemetall, varmpåvirket sone og grunnmateriale. Bildene har også tilknyttede hardhetsmålinger.



Figur 5.3: Bilde a) viser en typisk mikrostruktur i sveisemetallet. Det er innslag av sideplateferritt, men det antas at det er martensitt til stede når man tar hardhetsverdien med i betraktningen. Bilde b) er tatt i varmpåvirket sone og c) er fra grunnmaterialet som består av ferritt og perlitt.

Figur 5.4 på neste side viser hardhetsdistribusjonen fra sveisemetall til grunnmaterialet for blindhub, både før og etter spenningsgløding.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.4: Hardhetsmålinger fra tetteflaten på blindhub, tatt gjennom sveiseforbindelsens tre soner. Kurvene viser hardhetsdistribusjonen før og etter spenningsgløding. Bildene a), b) og c) viser typisk mikrostruktur i sveisemetall, varmepåvirket sone og grunnmateriale. Hardhetsverdiene er markert på akse for Vickers hardhet (se også Figur 5.3).

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

5.1.3 Oppsummering av test 1.1 og 1.2 - Blindhub

Tabellen under viser den maksimale hardheten som ble målt ved test 1.1 og 1.2 på makroer fra blindhub. I tillegg vises gjennomsnittet av hardhetsmålingene tatt ved test 1.1 (sveisemetall). Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 5.2: Gjennomsnittsmålinger og maksimale verdier for testserie 1, før og etter spenningsgløding.

Blindhub, testserie 1	Gjennomsnitt	Maks HV 0,05	
	Test 1.1	Test 1.1	Test 1.2
Før spenningsgløding	276,5	326,6	308,0
Etter spenningsgløding	243,3	302,8	263,3
% reduksjon i hardhet:	12,0		

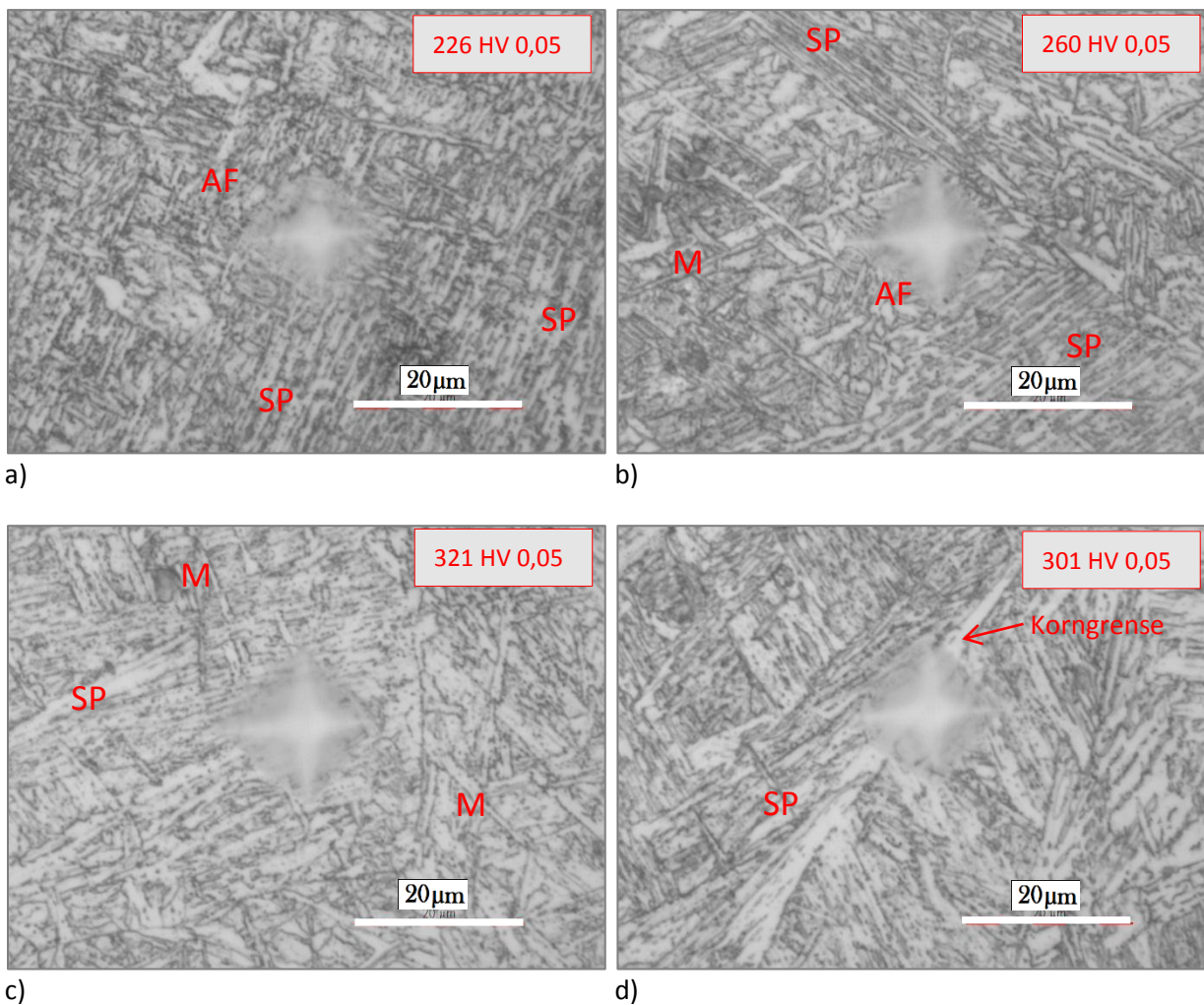
Vi får en gjennomsnittlig hardhetsreduksjon på 12 % fra før til etter spenningsgløding. Allikevel er noen av målingene fremdeles over krav etter denne varmebehandlingen.

Mikrostrukturen i det øverste sveiselaget er preget av mye martensitt, spesielt i området ved sist påførte sveisestreng. Ellers er det observert en mikrostruktur preget av grove nåler med sideplateferritt.

5.2 Testserie 2: Rør

5.2.1 Test 2.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall

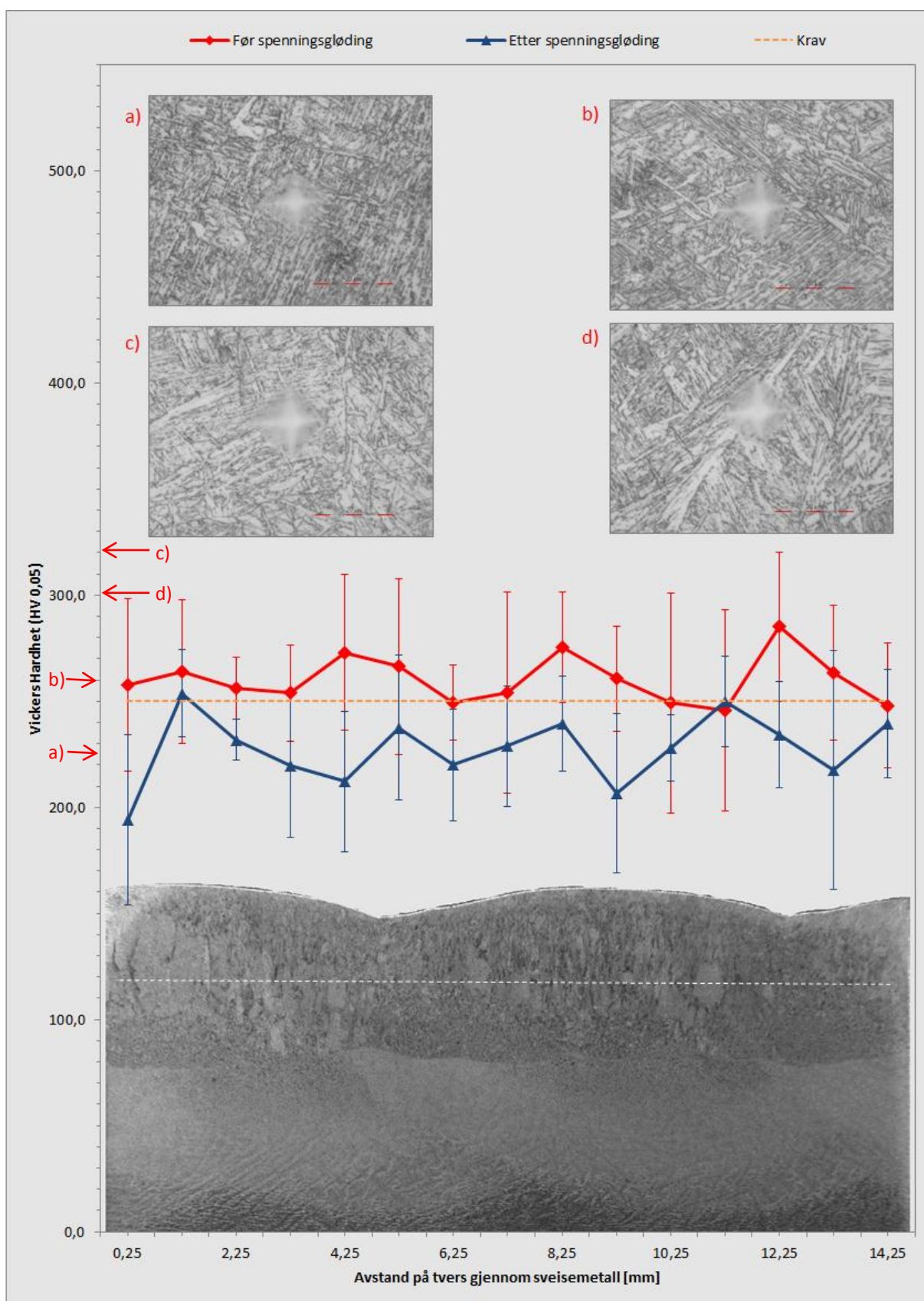
Bildene på Figur 5.5 a) til d) under, viser et utdrag fra bildene tatt med metallmikroskop i områder med tilknyttede hardhetsverdier. Man kan se at mikrostrukturen er preget av mye sideplateferritt (SP), men også med innslag av martensitt (M) og aciculær ferritt (AF). Alle bildene under er tatt av prøver uten spenningsgløding.



Figur 5.5: Bilde a) har en mikrostruktur med kaotisk, fint fordelte nåler med et lavt lengde-til-bredde forhold som kjennetegnes ved aciculær ferritt (AF), men også med noe sideplateferritt (SP) i området rundt. Bilde b) har noe tegn til aciculær ferritt rundt Vickers-inntrykket, men med sideplateferritt og tegn til martensitt (M) som lange nåler i området rundt avtrykket. Bilde c) viser noe sideplateferritt, sammen med lange nåler av martensitt på tvers av Vickers-avtrykket. Bilde d) viser at inntrykket er tatt på en tidligere austenitt-korngrense. Man ser tydelig parallelle nåler av sideplateferritt langs korngrensen. Mikrostrukturen er mest preget av sideplateferritt, men med mulig innslag av martensitt. Alle bildene er av makroer uten spenningsgløding.

Hardhetsdistribusjonen fra sveisemetallet på rør, fra før og etter spenningsgløding, vises i Figur 5.6 på neste side. Diagrammet viser en heltrukket linje for gjennomsnittsmålinger i sveisemetall tatt på 6 makroer fra rør, med tilknyttet standardavvik. Miniaturbilder fra Figur 5.5 er plassert på diagrammet, med markerte hardhetsverdier. Hvit stiplet linje viser hvor i sveisemetallet målingene er tatt, ca 1,5 mm fra sveiseoverflaten.

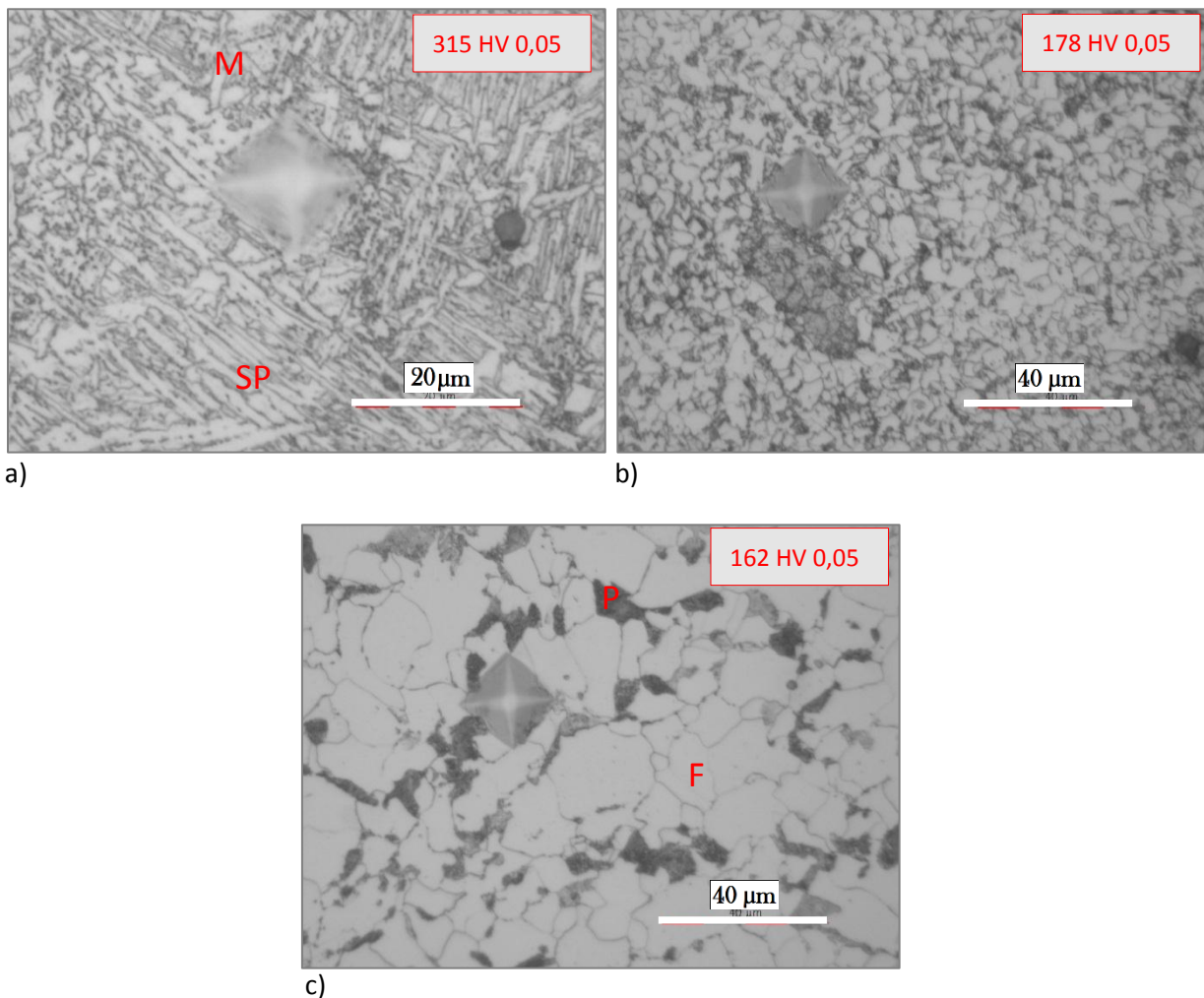
Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.6: Hardhetsmålinger tatt på tvers gjennom sveisemetall, før og etter spenningsgløding. Bildene a) til d) er de samme bildene som er presentert i Figur 5.5, og de tilhørende hardhetsverdiene er markert på akse for Vickers hardhet.

5.2.2 Test 2.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen

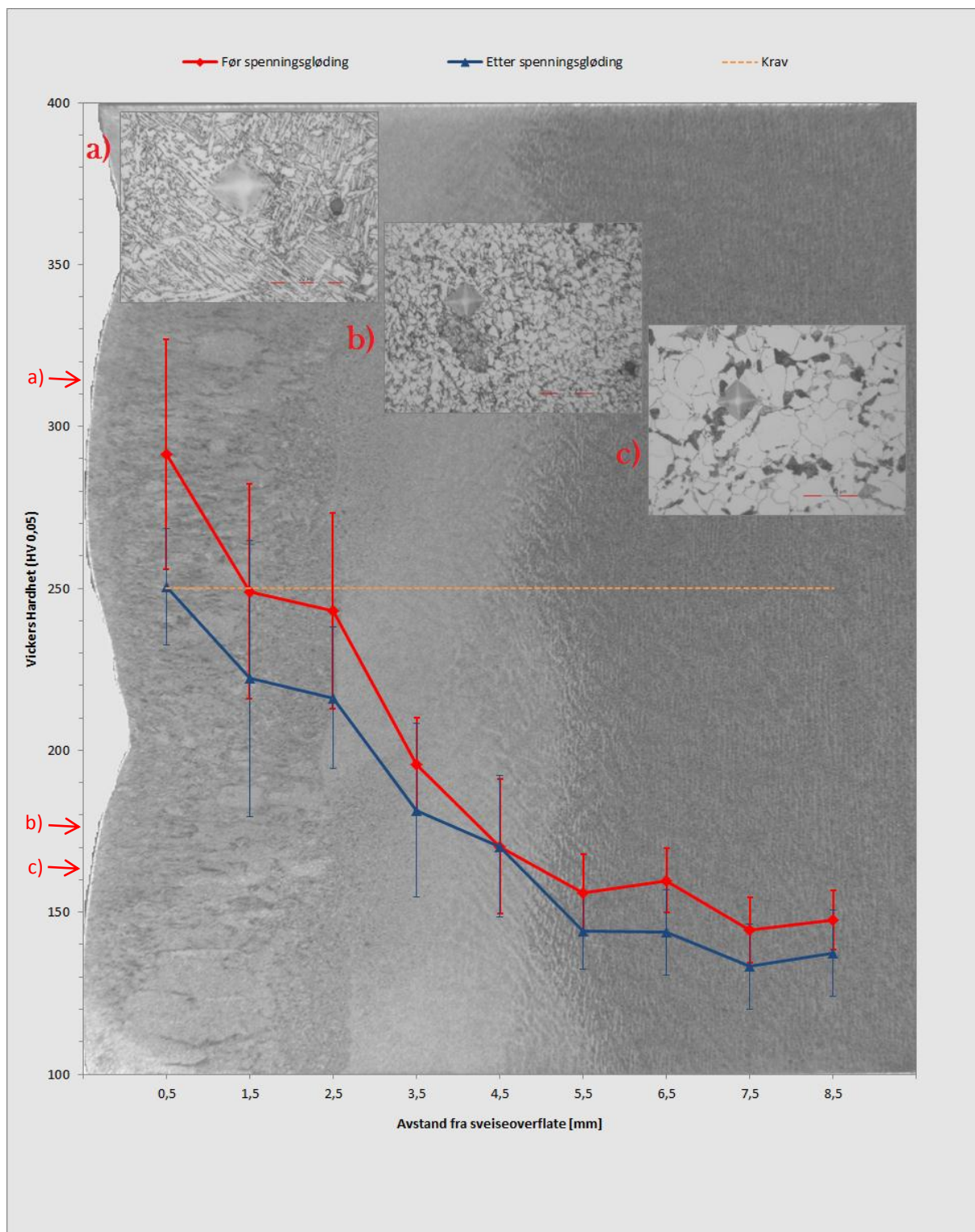
Det ble tatt fire parallelle serier med hardhetsmålinger på makroer med og uten spenningsgløding. Målingene ble tatt innover gjennom sveisemetall, varmepåvirket sone og til og med upåvirket grunnmateriale. Det ble tatt målinger med 1 mm mellomrom innover i metallet, fra 0,5 mm fra sveiseoverflaten. Bildene på Figur 5.7 under viser bilde av typisk mikrostruktur som finnes i sveisemetall, varmepåvirket sone og grunnmateriale. Bildene har også tilknyttede hardhetsmålinger.



Figur 5.7: Bilde a) er preget av sideplateferritt (SP) og ellers litt blandet struktur. Mulig innslag av martensitt (M) som kan forklare den høye hardheten. Bilde b) er tatt i varmepåvirket sone og man ser en tydelig fordeling av små korn og oppløst perlitt. Bilde c) er fra grunnmaterialet og viser mikrostruktur bestående av ferritt og perlitt. Prøvene knyttet til bilde b) og c) er spenningsglødet. (Merk ulik skala på bilde a) i forhold til b) og c))

Figur 5.8 på neste side viser hardhetsdistribusjonen for makroer tatt fra rør, før og etter spenningsgløding. Målingene er tatt fra sveisemetall, gjennom varmepåvirket sone og til grunnmaterialet. Gjennomsnittsmålingene er presentert med tilhørende standardavvik. Man ser tydelig en reduksjon i hardhet etter spenningsgløding. Bildene fra Figur 5.7 er plassert som miniatyrbilder med hardhetsverdiene markert på hardhetsskalaen.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.8: Hardhetsmålinger fra rør, tatt gjennom sveiseforbindelsens tre soner. Kurvene viser hardhetsdistribusjonen før og etter spenningsgløding. Bildene a) til c) er de samme bildene som er presentert i Figur 5.7, og de tilhørende hardhetsverdier er markert på aksene for Vickers hardhet.

5.2.3 Oppsummering av test 2.1 og 2.2 - Rør

Tabellen under viser både gjennomsnitt og maksimale fra test 2.1 og 2.2. Det er ikke tatt gjennomsnittsverdi for test 2.2, da dette er målinger tatt i tre ulike hardhetssoner. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 5.3: Gjennomsnittsmålinger og maksimale verdier for testserie 2, før og etter spenningsgløding.

Rør, testserie 2	Gjennomsnitt	Maks HV 0,05	
	Test 2.1	Test 2.1	Test 2.2
Før spenningsgløding	260,1	340,6	319
Etter spenningsgløding	227,5	266,6	268
% reduksjon i hardhet:	12,5		

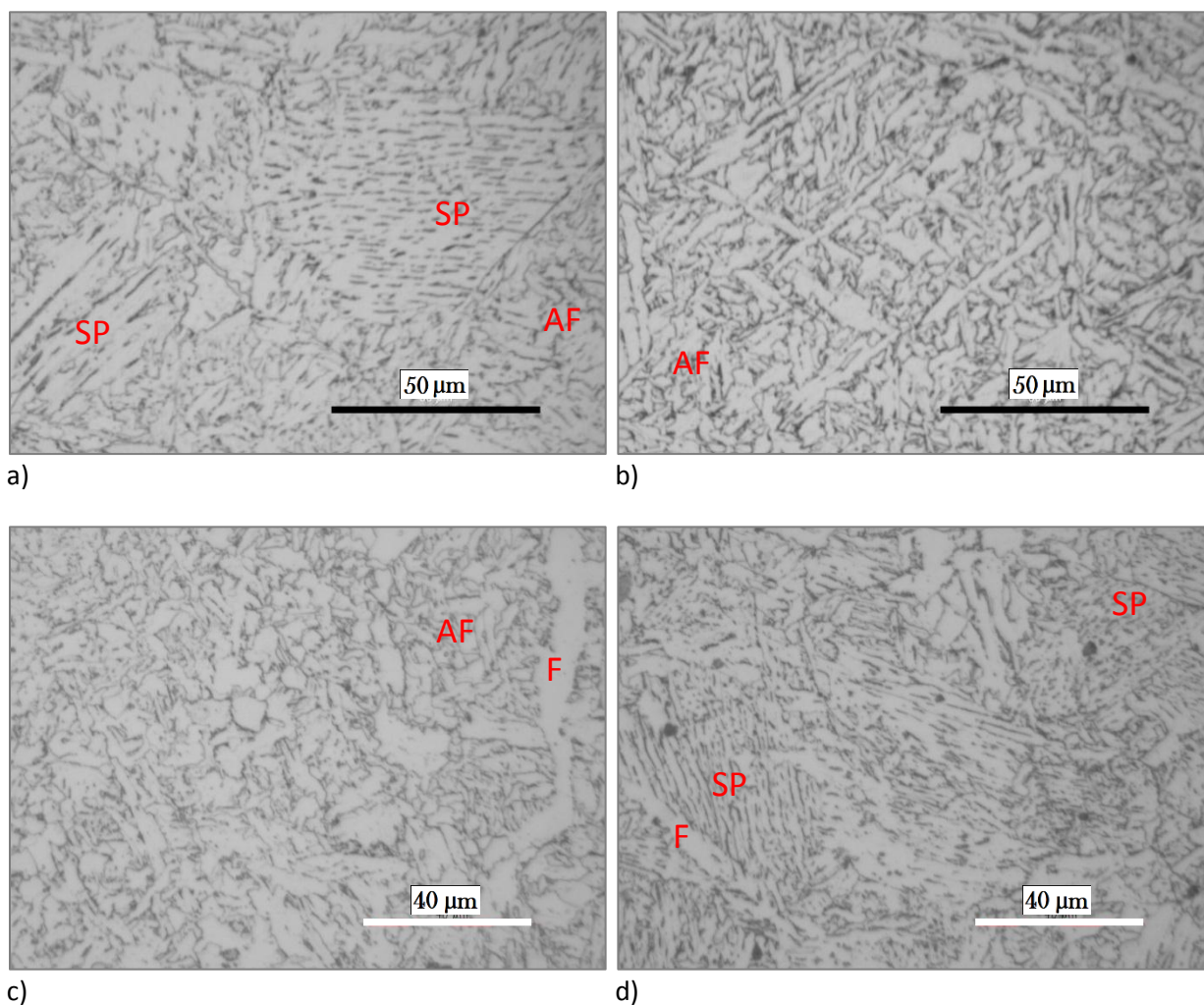
I følge resultatene for test 2.1, vil man etter spenningsgløding få en gjennomsnittlig reduksjon i hardheten på ca. 12,5 %.

Fra bildene fra mikrostrukturen kan man se at sveiseforbindelsen øverste lag er preget av mye sideplateferritt, med innslag av martensitt. Dette vil forklare de høye hardhetsverdiene man finner i sveisemetallet.

5.3 Testserie 3a: Stang

5.3.1 Test 3.1: Hardhet og mikrostruktur i sveisemetall

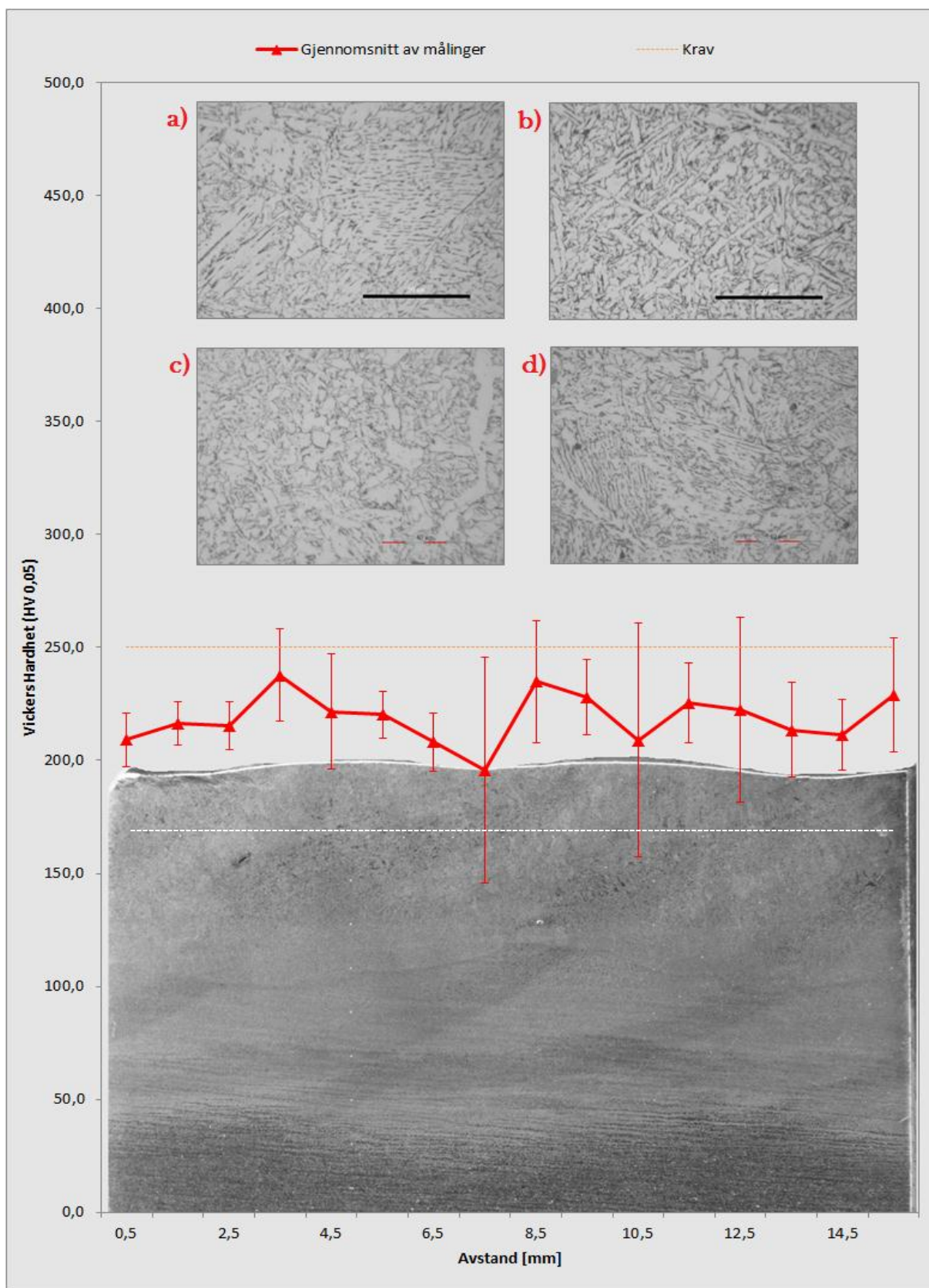
Bildene i Figur 5.9 under viser typisk mikrostruktur funnet i sveisemetall fra stangmaterialet. Det er en overvekt av mikrostruktur som aciculær ferritt (AF), sideplateferritt (SP) samt noe korngranseferritt (F).



Figur 5.9: Bilde a) viser mikrostruktur med sideplateferritt (SP) og aciculær ferritt (AF). Bilde b) består av noe aciculær ferritt (AF). Bilde c) viser korngranseferritt (F) sammen med aciculær ferritt (AF) og d) viser noe korngranseferritt sammen med sideplateferritt (SF).

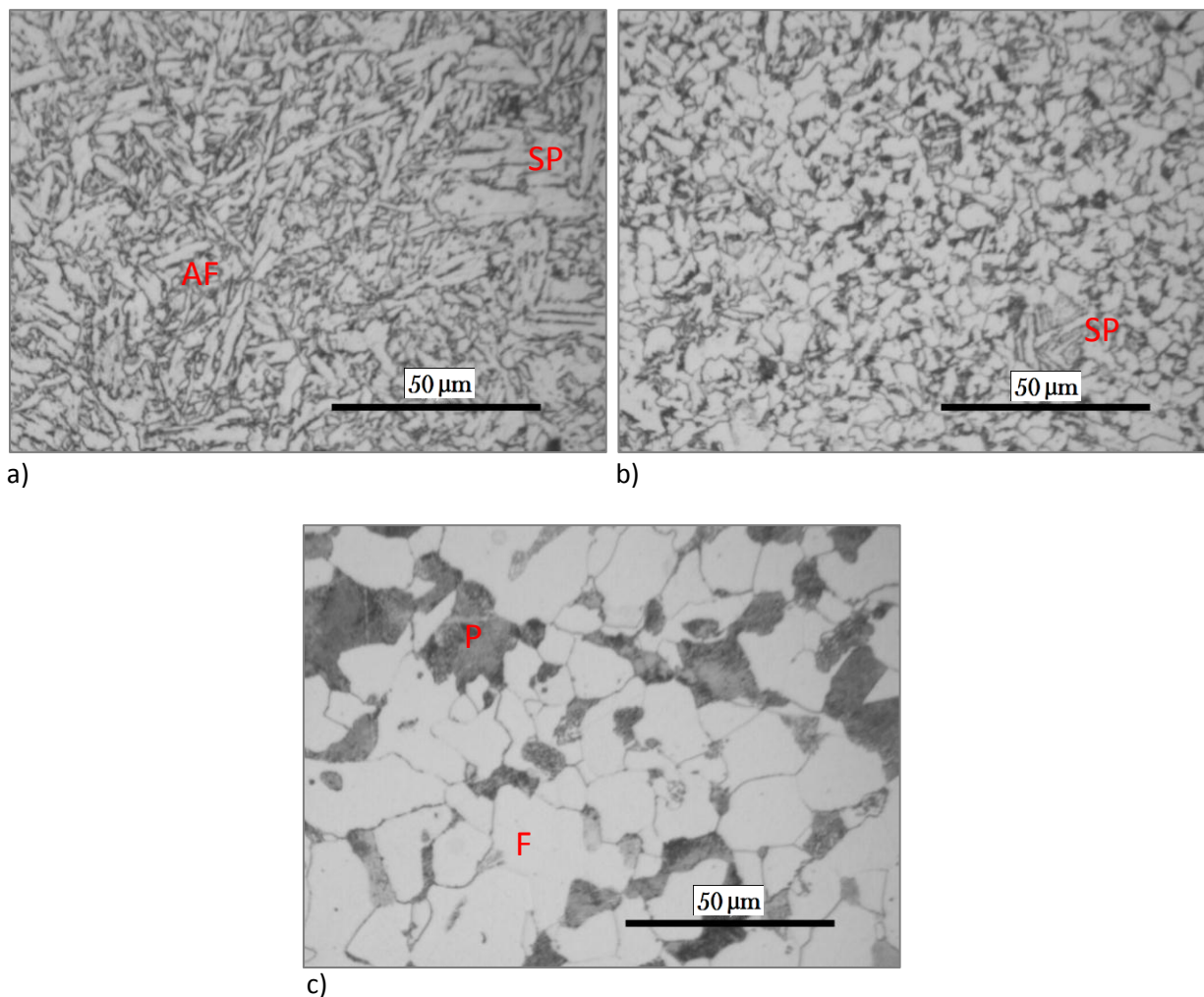
Figur 5.10 på neste side viser gjennomsnittet av målinger tatt i sveisemetallet, med standardavvik. Hvit stiplet linje viser hvor målingene er tatt med 1 mm mellomrom. Gjennomsnittsmålingene er basert på to måleserier, dermed er spredningen relativt stor.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveisning av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.10: Presentasjon av hardhetsmålinger tatt i sveisemetall for stang, sammen med bilder av typisk mikrostruktur som er å finne i sveisemetallet. Bildene a) til d) er de samme bildene som er presentert i Figur 5.9.

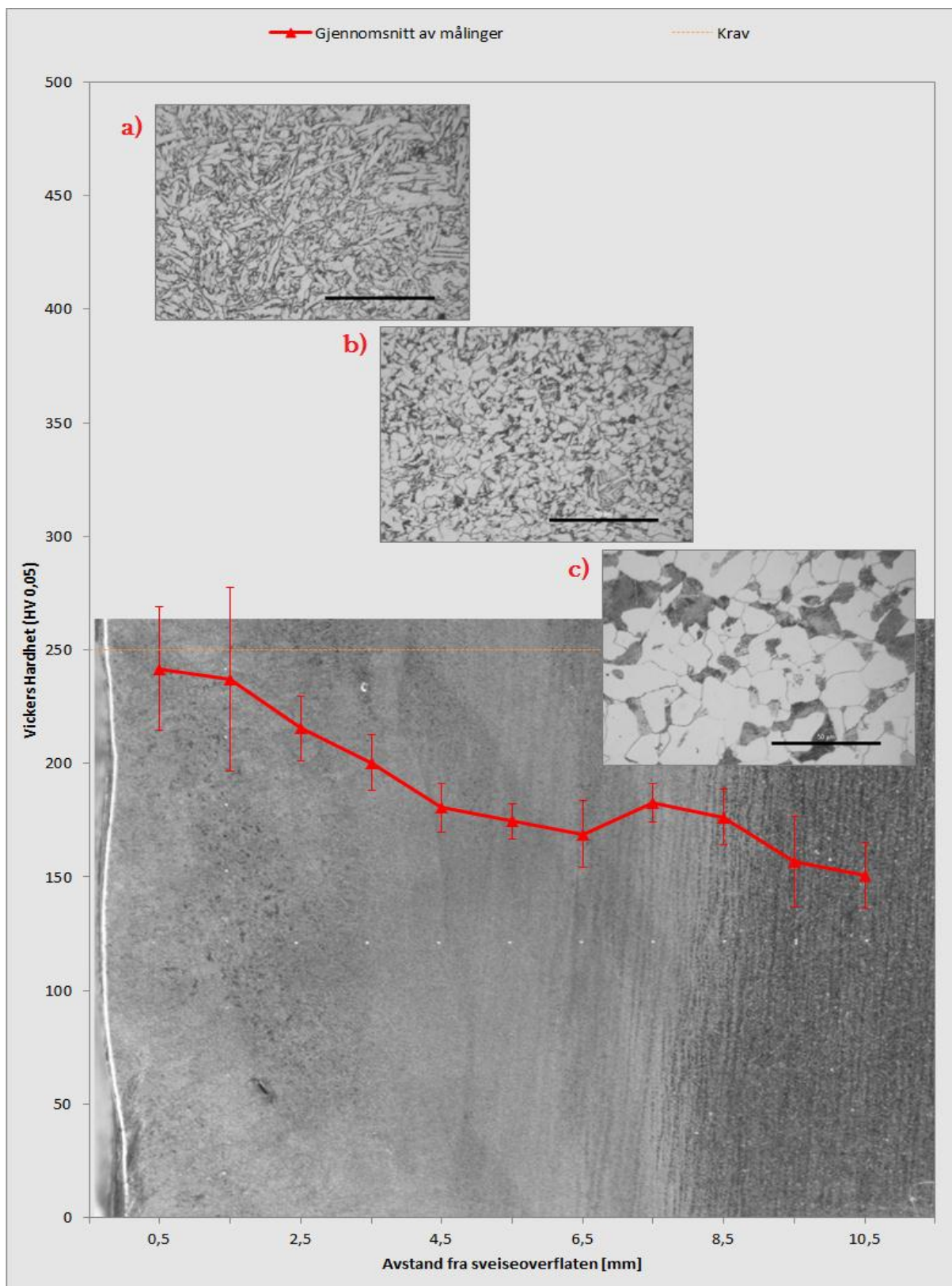
5.3.2 Test 3.2: Hardhet og mikrostruktur på tvers av sveisesonen



Figur 5.11: Bilde a) viser typisk mikrostruktur i sveisemetallet for stang, bestående av aciculær ferritt (AF) og små mengder med sideplateferritt (SP). Bilde b) er fra varmpåvirket sone med begynnende vekst av sideplateferritt (SP). Bilde c) viser mikrostrukturen i grunnmaterialet som består av ferritt og perlitt.

Figur 5.12 på neste side viser hardhetsdistribusjonen for sveiseforbindelsen til stang, med bildene fra figuren over satt inn for å illustrere den typiske mikrostrukturen i forhold til sveiseområdet.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.12: Grafisk fremstilling av hardhetsdistribusjonen i sveiseforbindelsen til stang, samt bilder av typisk mikrostruktur man kan finne i sveisemetall, varmepåvirket sone og grunnmateriale på prøvene fra stang. Man kan se at de fleste hardhetsmålingene ligger under kravet på maks 250 HV, men med noen målinger som overstiger kravet i øverste sveiselag. Bildene a) til c) er de samme bildene som er presentert i Figur 5.11-

5.3.3 Oppsummering av test 3.1 og 3.2 - Stang

Tabell 5.4 under viser gjennomsnittsmåling for test 3.1 samt høyeste målte verdi for test 3.1 og 3.2. Man ser at gjennomsnittet i sveisemetallet ligger ganske lavt i forhold til på rør og blindhub, men allikevel med målt maksimal hardhet som ligger over maksimumskravet som stilles i denne sammenhengen. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 5.4: Gjennomsnittsmålinger og maksimal hardhet for testserie 3a, målt ved test 3.1 og 3.2

Stang , testserie 3a	Gjennomsnitt	Maks HV 0,05	
	Test 3.1	Test 3.1	Test 3.2
	218,6	263,7	266,6

Mikrostrukturen viser lite tegn til martensitt, både fra en visuell betraktning samt i forhold til hardhetsverdiene. Det er noe innslag av sideplateferritt, men stort sett en mikrostruktur som bærer preg av en gunstig avkjølingshastighet og muligens kjemisk sammensetning av sveisetilsett. Mikrostrukturen har jevnt over vært veldig jevn og vanskelig å tolke, men tydelig aciculær ferritt har blitt observert flere steder.

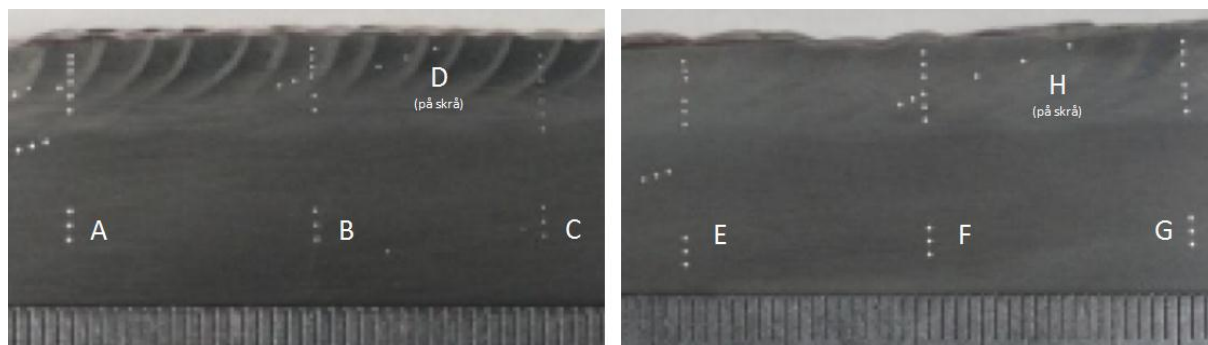
5.4 Testserie 3b og 3c: Stang

For å gi ekstra variabler å diskutere rundt, etter testingen på blindhub, rør og stang, ble det av kontraktør sveiset opp ytterligere to sveiseprosedyrer. Her ble prosedyrespesifikasjonen for testserie 2 og 3a brukt som utgangspunkt ved valg av sveisetekniske parametere i sveiseprosedyre. Tabell 5.5 under lister opp disse nye variablene. Rødt markerer der de største endringene i parametere ha blitt gjort. Materialene skulle opprinnelig bli testet på UiS i forbindelse med denne oppgaven, men på grunn av sent leveringstidspunkt ble de testet av Exova på oppdrag fra operatør.

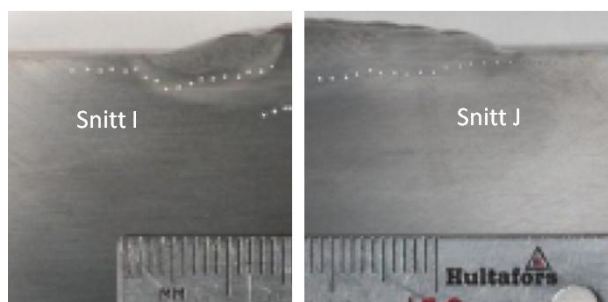
Tabell 5.5: Sveiseteknisk informasjon fra testserie 3b og 3c, sammen med resultater fra maks målte hardhet.

Test-serie:	Basert på prosedyre fra testserie:	Sveise-metode	Grunn-materiale	Tilsett	Forvarme [°C]	Varme-tilførsel [kJ/mm]	CE	Maks målt HV10
3b	3a	TIG	Stang	A	200	1,21 – 1,30	0,41	320
3c	2	TIG	Stang	B	75	1,36 – 1,45	0,47	314

Den maksimale hardheten for tilsett A ble målt i snitt A – H (320 HV10), og for tilsett B i snitt I – J (314 HV10). De maksimale hardhetsverdiene for disse to nye testseriene er svært lite, til tross for en større forvarme for tilsett A. For tilsett B ble den maksimale hardheten i snitt A – H 274 HV10. Hvis man sammenligner kun hardhetsverdiene tatt midt på sveiseområdet (snitt A – H), så kommer sveisetilsett A helt klart dårligst ut. Figur 5.15 og Figur 5.16 viser bilder fra hardhetsmålinger utført i snitt A – J.



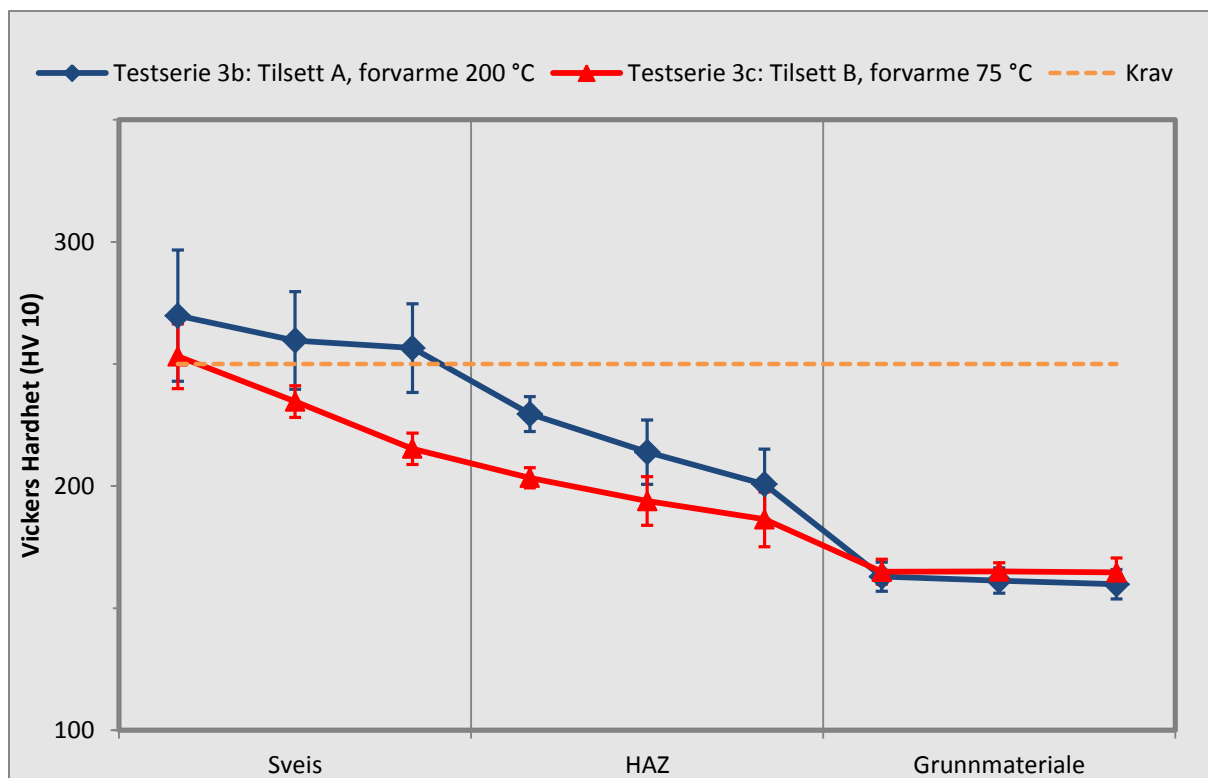
Figur 5.13: Bilde som viser hvor de ulike snitt er tatt i forbindelse med hardhetstesting av testserie 3b og 3c. Bildet er hentet fra testsertifikat fra Exova.



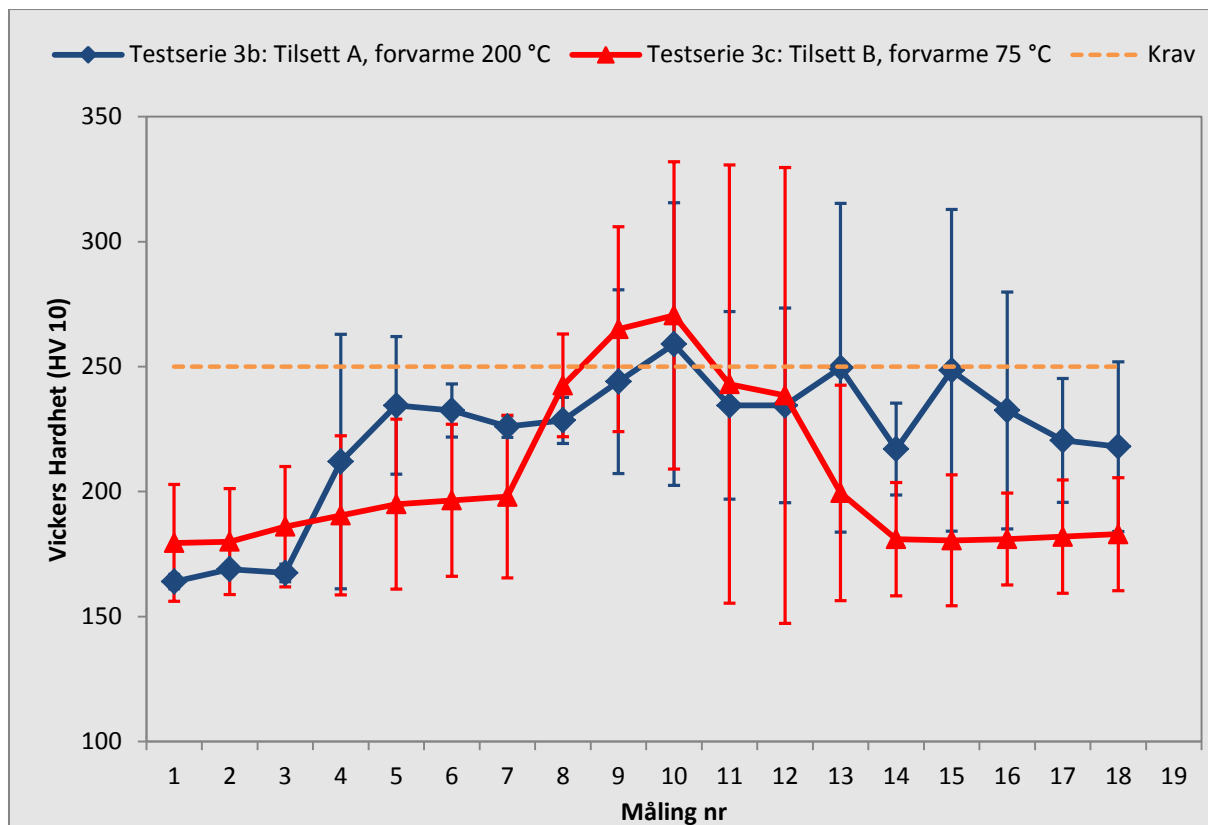
Figur 5.14: I tillegg til hardhetsmålinger i snitt A til H, ble det tatt målinger i snitt I og J som vist på figuren. Dette er fra kanten av påleggsveis ved overgang til grunnmateriale.

Figur 5.15 og Figur 5.16 på neste side vises hardhetsdistribusjonen (med standardavvik) for målinger i snitt A – J, utført av Exova.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 5.15: Hardhetsmålinger utført av Exova i snitt A - H på testserie 3b og 3c.



Figur 5.16: Hardhetsmålinger utført av Exova i snitt I og J for testserie 3b og 3c.

5.5 Teoretisk beregning av Vickers hardhet i sveisemetall

Til beregning av teoretisk maksimal hardhet i sveisemetall for tilsett A og B har det blitt brukt en beregningsmodell utarbeidet av kontraktør. Denne modellen og likningene bak er presentert i kapittel 4.2.2. I samme kapittel er det oppgitt en virkningsgrad for TIG-sveising på 0,3 til 0,6. Det er på bakgrunn av dette antatt en virkningsgrad på 0,45 i disse beregningene.

Tabell 5.6: Inputdata nødvendig for beregning av maks HV og avkjølningshastighet.

Testserie	Sveise-tilsett	Forvarme [°C]	P _{cm}	%C	t [mm]
2 – Rør	A	100	0,223	0,09	25
3a – Stang	B	200	0,184	0,105	26
3b – Stang	A	200	0,223	0,09	26
3c – Stang	B	75	0,184	0,105	26

Det er verdt å merke seg at ved en godstykkelse på over 23 mm, vil man ha tredimensjonal varmeledning. Dette er forklart i kapittel 2.2.1. Derfor vil avkjølningshastigheten for alle de nevnte testseriene kun være avhengig av forvarme, varmetilførsel og virkningsgrad.

For å beregne karbonekvivalenten P_{cm} , har tall fra materialsertifikater for sveisetilsett A og B blitt brukt. Disse finnes i vedlegg A. Tabell 5.7 viser kjemisk innhold av legeringselementene som inngår i formelen for P_{cm} . (Ref. kapittel 0 om sveisbarhet)

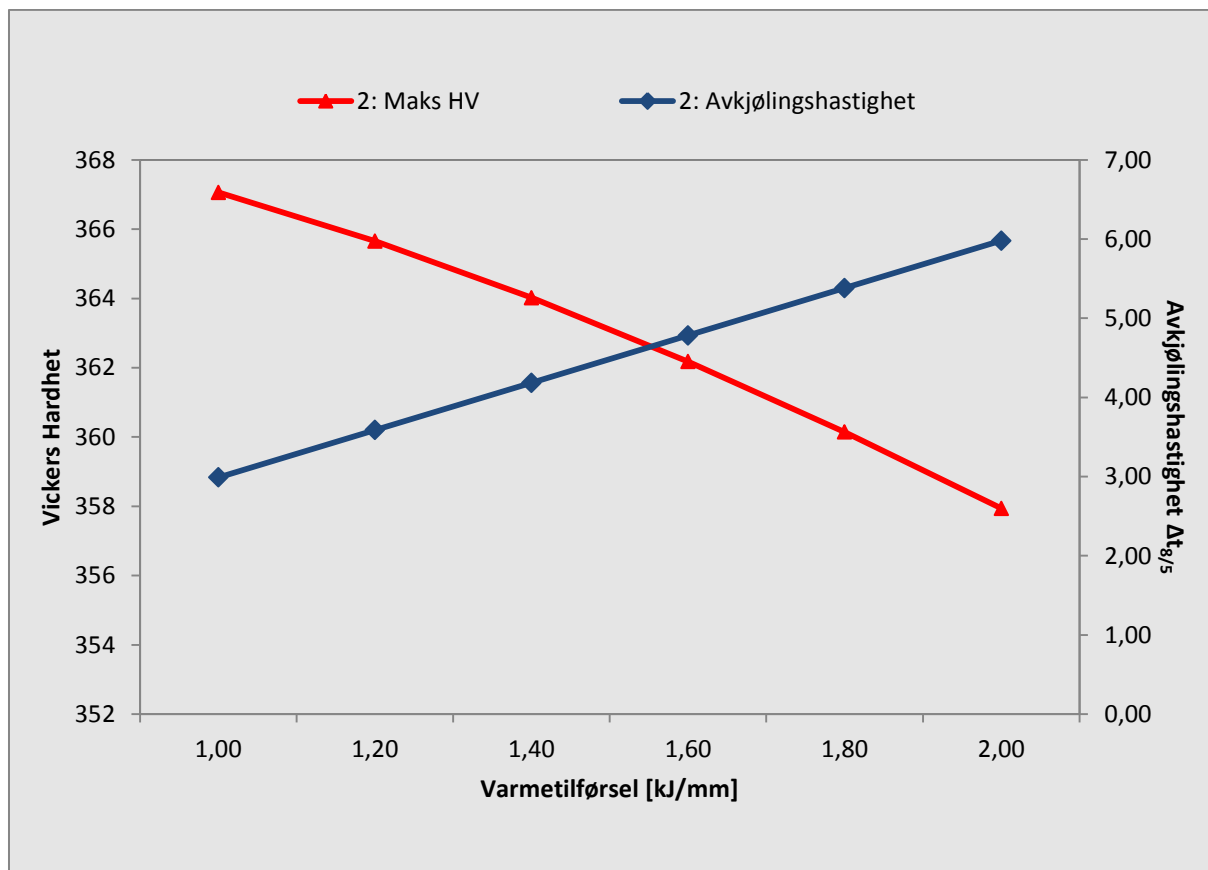
Tabell 5.7: Kjemisk sammensetning for sveisetilsett A og B.

Tilsett	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%V
A	0,09	1,33	0,84	0,04	0,78	0,4	0,05	0,005
B	0,105	1,15	0,56	0,04	0,01	0,01	0	0,004

5.5.1 Sveisetilsett A

5.5.1.1 Testserie 2

Figur 5.17 viser hvordan de beregnede verdiene for maksimal hardhet og avkjølingshastighet varierer som funksjon av tilført varme.



Figur 5.17: Diagrammet viser hvordan beregnet maksimal hardhet og avkjølingshastighet, for testserie 2, varierer som funksjon av tilført varme. Testserie 2 er et rør som er påleggssveiset med sveisetilsett A og med en arbeidstemperatur på 100 °C.

Tabell 5.8 under viser de aktuelle verdiene for beregnet avkjølingshastighet og maks hardhet som er presentert i Figur 5.17. Den gir også en gjennomsnittsverdi for beregnet maks hardhet, samt hardhetsverdien for den minst gunstige varmetilførsel. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

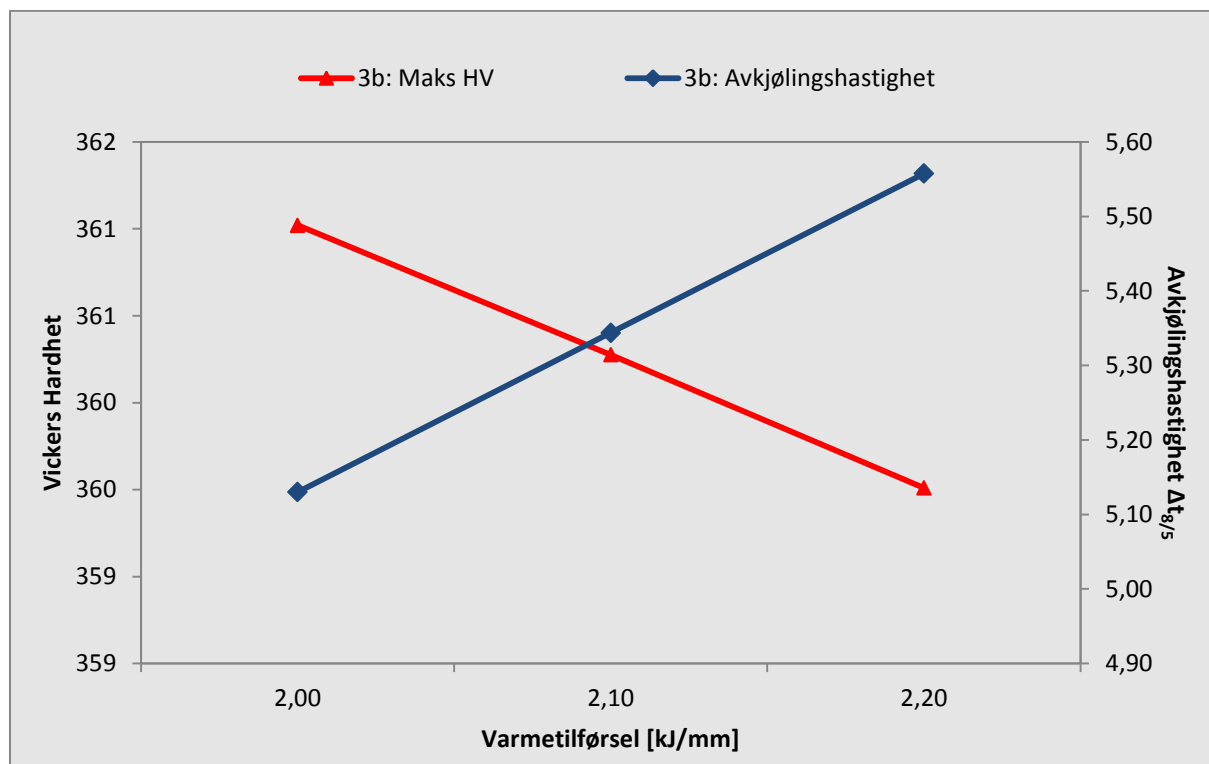
Tabell 5.8: Beregning av avkjølingshastighet og maksimal hardhet for testserie 2.

Virkningsgrad	Varmetilførsel [kJ/mm]	Avkjølingshastighet [s]	HV _{maks}
0,45	1,00	2,99	367
0,45	1,20	3,59	366
0,45	1,40	4,19	364
0,45	1,60	4,78	362
0,45	1,80	5,38	360
0,45	2,00	5,98	358
Gjennomsnitt:			363
Maks:			367

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

5.5.1.2 Testserie 3b

Figur 5.17 viser hvordan de beregnede verdiene for maksimal hardhet og avkjølingshastighet varierer som funksjon av tilført varme.



Figur 5.18: Diagrammet viser hvordan beregnet maksimal hardhet og avkjølingshastighet, for testserie 3b, varierer som funksjon av tilført varme. Testserie 3b er en stang som er påleggssveiset med sveisetilsett A og med en arbeidstemperatur på 200 °C.

Tabell 5.9 under viser de aktuelle verdiene for beregnet avkjølingshastighet og maks hardhet som er presentert i Figur 5.18. Den gir også en gjennomsnittsverdi for beregnet maks hardhet, samt hardhetsverdien for den minst gunstige varmetilførsel. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

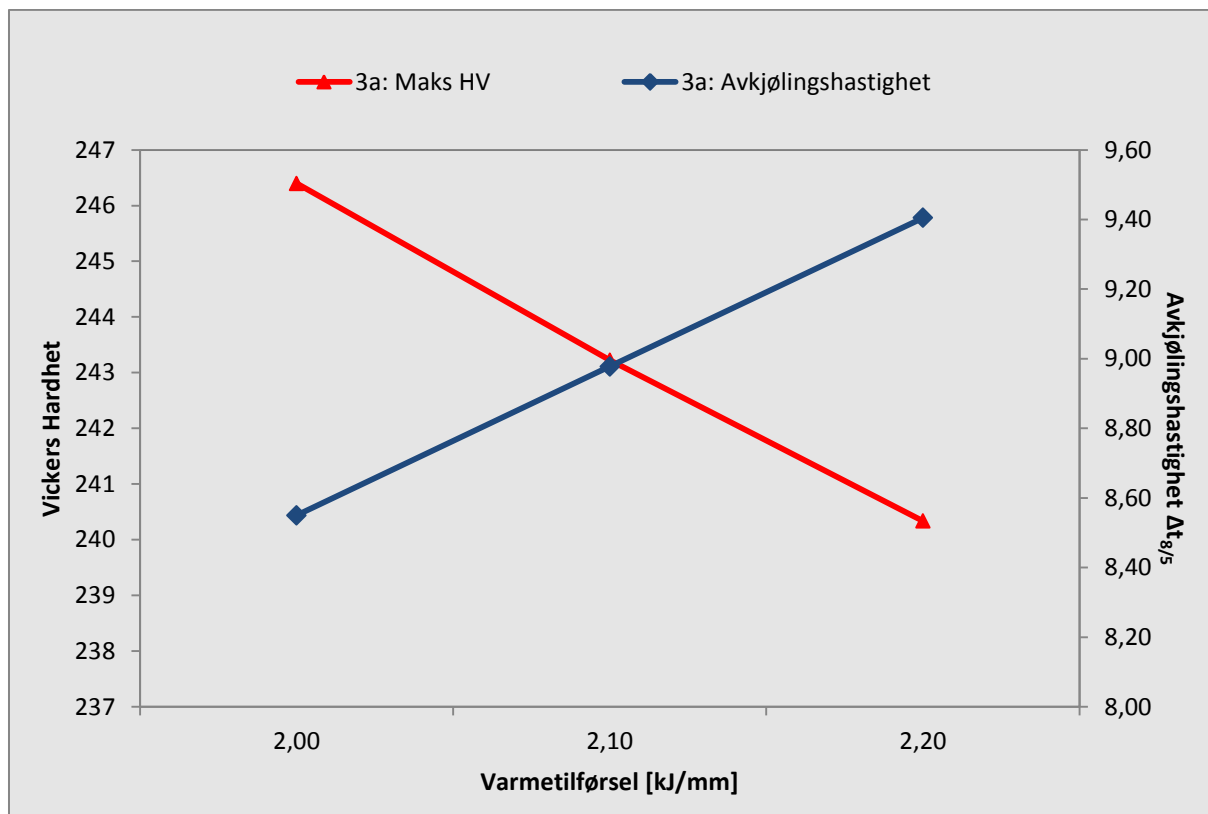
Tabell 5.9: Beregning av avkjølingshastighet og maksimal hardhet for testserie 3b.

Virkningsgrad	Varmetilførsel [kJ/mm]	Avkjølingshastighet [s]	HV _{maks}
0,45	1,20	5,13	361
0,45	1,25	5,34	360
0,45	1,30	5,56	360
Gjennomsnitt:			360
Maks:			361

5.5.2 Sveisetilsett B

5.5.2.1 Testserie 3a

Figur 5.19 viser hvordan de beregnede verdiene for maksimal hardhet og avkjølingshastighet varierer som funksjon av tilført varme.



Figur 5.19: Diagrammet viser hvordan beregnet maksimal hardhet og avkjølingshastighet, for testserie 3a, varierer som funksjon av tilført varme. Testserie 3a er en stang som er påleggssveiset med sveisetilsett B og med en arbeidstemperatur på 200 °C.

Tabell 5.10 under viser de aktuelle verdiene for beregnet avkjølingshastighet og maks hardhet som er presentert i Figur 5.19. Den gir også en gjennomsnittsverdi for beregnet maks hardhet, samt hardhetsverdien for den minst gunstige varmetilførsel. Ingen av de beregnede verdiene for maks hardhet overstiger kravet til maksimumskravet, som er på 250 HV.

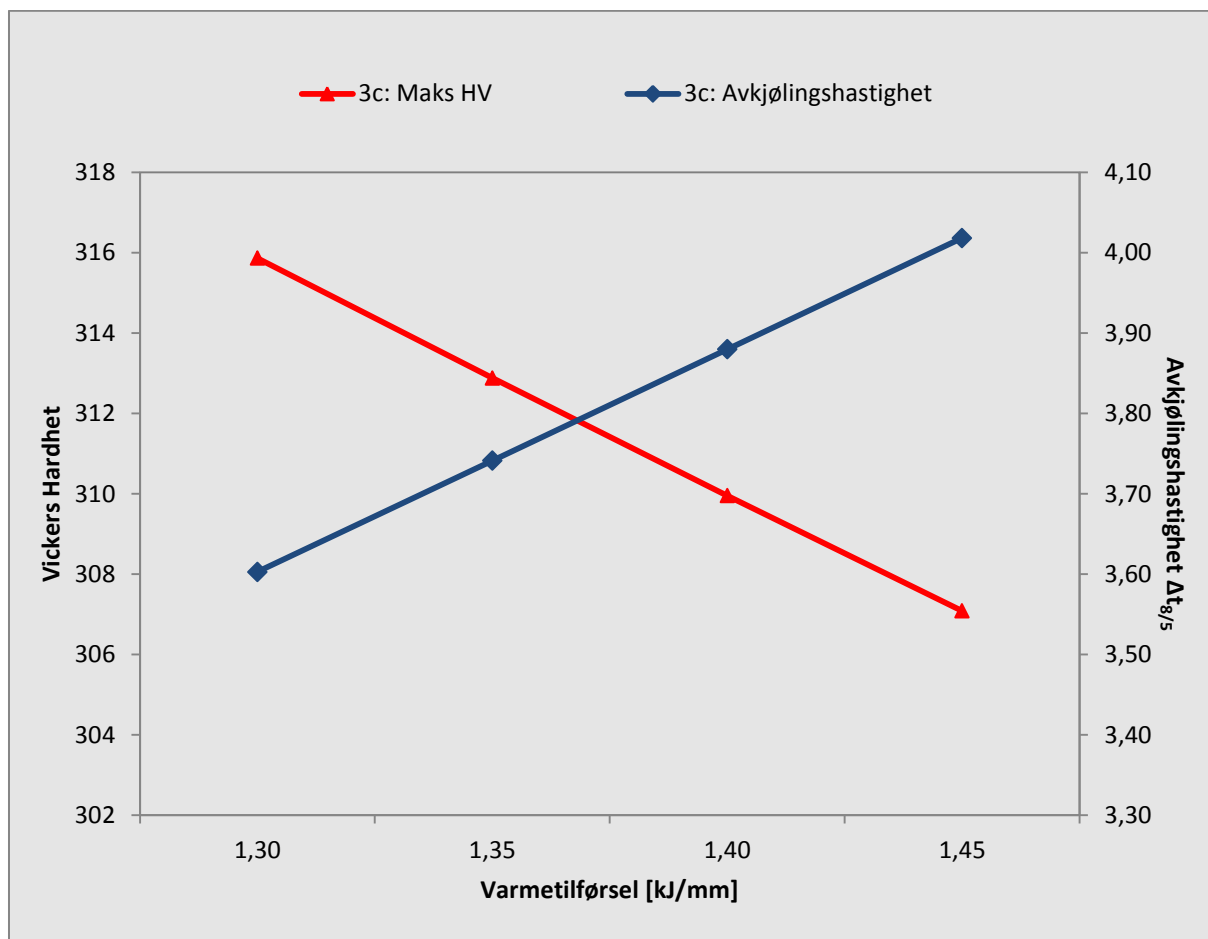
Tabell 5.10: Beregning av avkjølingshastighet og maksimal hardhet for testserie 3a.

Virkningsgrad	Varmetilførsel [kJ/mm]	Avkjølingshastighet [s]	HV _{maks}
0,45	2,00	8,55	246
0,45	2,10	8,98	243
0,45	2,20	9,41	240
Gjennomsnitt:			243
Maks:			246

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

5.5.2.2 Testserie 3c

Figur 5.20 viser hvordan de beregnede verdiene for maksimal hardhet og avkjølingshastighet varierer som funksjon av tilført varme.



Figur 5.20: Diagrammet viser hvordan beregnet maksimal hardhet og avkjølingshastighet, for testserie 3c, varierer som funksjon av tilført varme. Testserie 3c er en stang som er påleggssveiset med sveisetilsett B og med en arbeidstemperatur på 75 °C.

Tabell 5.11 under viser de aktuelle verdiene for beregnet avkjølingshastighet og maks hardhet som er presentert i Figur 5.20. Den gir også en gjennomsnittsverdi for beregnet maks hardhet, samt hardhetsverdien for den minst gunstige varmetilførsel. Røde tall i tabellen markerer verdier som ligger over kravet til maksimal hardhet, som er på 250 HV.

Tabell 5.11: Beregning av avkjølingshastighet og maksimal hardhet for testserie 3c.

Virkningsgrad	Varmetilførsel [kJ/mm]	Avkjølingshastighet [s]	HV _{maks}
0,45	1,30	3,60	316
0,45	1,35	3,74	313
0,45	1,40	3,88	310
0,45	1,45	4,02	307
Gjennomsnitt:			311
Maks:			316

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

5.5.3 Oppsummert

Tabell 5.12 viser de beregnede verdiene for maks hardhet og avkjølingshastighet, for de forskjellige testseriene og type tilsett. Når man sammenligner hardhetsverdien i forhold til forvarmetemperaturen, så kan vil konstatere at kjemien spiller en stor rolle i endelig hardhet. Dette kan settes direkte i sammenheng med størrelsen på karbonekvivalenten P_{cm} .

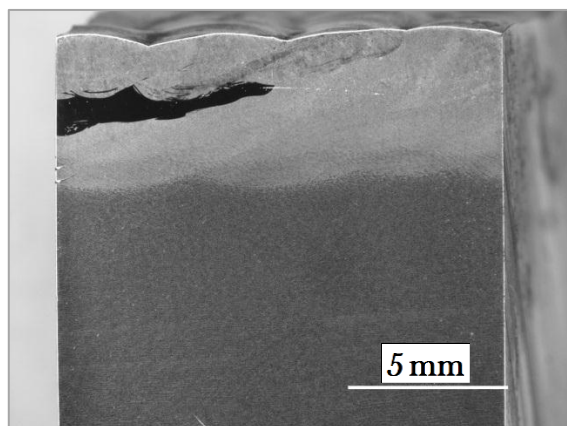
Tabell 5.12: Beregnede og målte hardhetsverdier for testserie 2 og 3a – c, sortert etter type tilsett.

Sveisetilsett	Testserie	Forvarme [°C]	Beregnet HV_{maks}	$\Delta t_{8/5}$ for HV_{maks} [s]	Målt HV_{maks}
A	2	100	367	2,99	364
	3b	200	361	5,13	320
B	3a	200	246	8,55	264
	3c	75	316	3,60	314

5.6 Andre funn

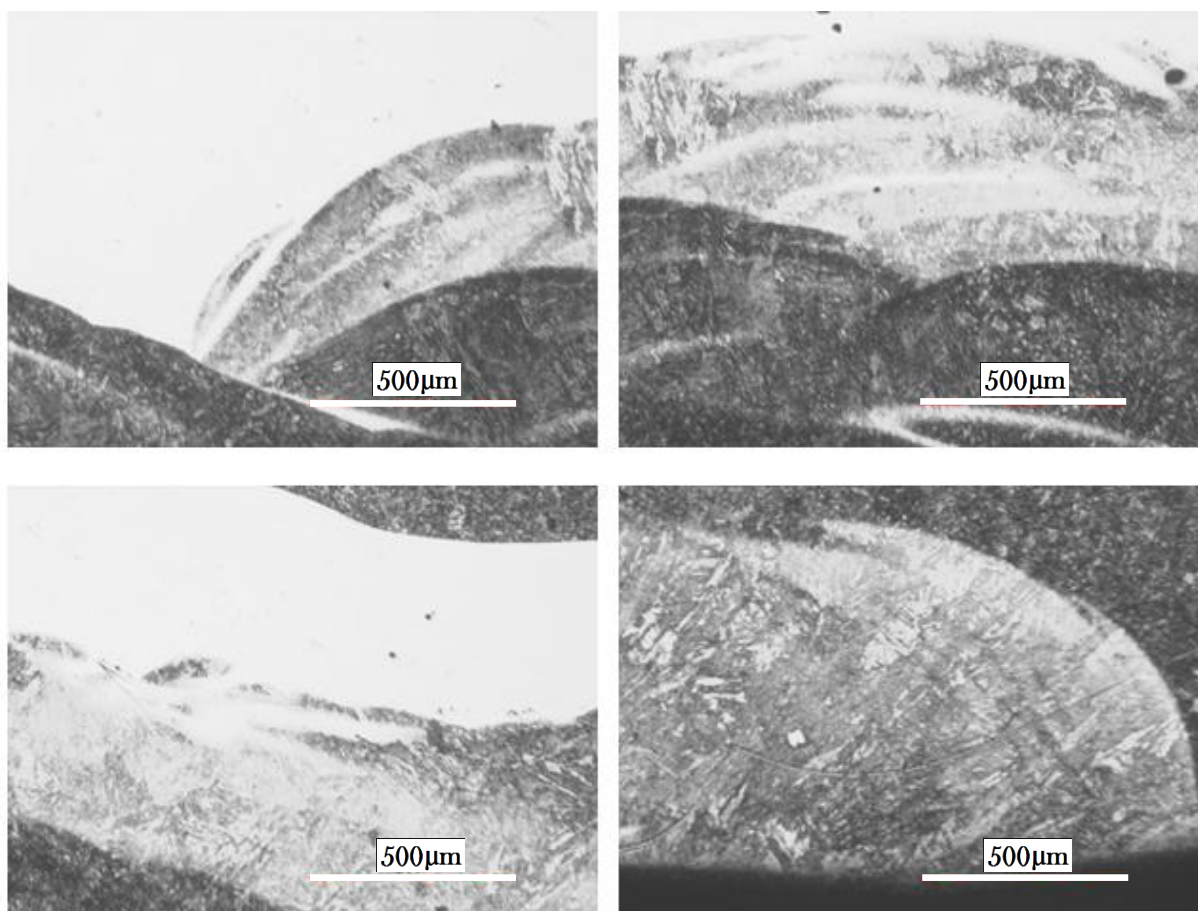
På en makro fra rør (se bilde til høyre) ble det etter etsning påvist et område midt i sveisen som ikke ble etset. Det viste seg etter undersøkelse av kjemien i området at det var en forhøyet kjemisk sammensetning av Ni, Cr og Mo i forhold til hva som står oppgitt på materialsertifikatet for sveisetilsettet. Dette har da medført at området har blitt ekstra rustbestandig og har dermed reagert dårligere på etseprosessen enn området rundt.

Etter et par runder ved sveiseekspertisen hos operatør ble det konkludert at dette mest sannsynlig kun er innblanding av en rustfri sveisetråd.



Figur 5.21: Polert flate av makro tatt fra rør, med et rustbestandig område mellom sveiselag en og to.

Bildeserien under viser bilder tatt med lysmikroskop fra ulike områder i sveisemetall hvor denne innblandingen av rustbestandig sveisemetall har oppstått. Bildene er tatt med x5 forstørrelse.



Figur 5.22: Ulike deler av sveis som har innblanding av annen sveisetråd.

6 Diskusjon

Oppgaven tar for seg hardhetsproblematikken knyttet til kvalifisering av sveiseprosedyrer på strømningsrør i karbonstål med H₂S-holdige produksjonsvæsker, når det stilles strenge krav til hardhet. På norsk sokkel er det i dag mange eldre installasjoner der rørsystemene består av karbonstål. Flenser og hubber på enkelte systemer er ofte sterkt utsatt for korrosjon på tetteflatene. Reparasjonssveising brukes som en metode for korrigerende vedlikehold ved slike korrosjonsskader. I arbeidet med denne oppgaven, har en sveisereparert blindhub og materialrester fra prosedyretesting blitt studert nærmere.

Tidligere testing har demonstrert viktigheten av et gunstig avkjølingsforløp for å oppnå de ønskede mekaniske egenskaper i sveiseområdet, samt for å tilfredsstille gitte hardhetskrav. Dette har blitt forbedret ved å bruke høyere arbeidstemperatur og ved å øke varmetilførselen. I tillegg har riktig valg av kjemi i sveisetilsettet vist seg å spille en viktig rolle.

Som vist i kapittel 5 har blindhub, rør og stang i arbeidet med denne oppgaven blitt testet med Vickers mikrohardhetsmålinger. Det har dessuten blitt gjort forsøk på å kartlegge mikrostrukturen i sveisemetallet ut ifra tilknyttede hardhetsverdier. Det har blitt beregnet teoretiske hardhetsverdier for sammenligning med målte hardhetsverdier, og avkjølingshastigheten for hvert sveisetilsett har blitt beregnet teoretisk. I tillegg har utvalgte makroer fra testserie 1 og 2 blitt spenningsglødet for å undersøke hvor stor reduksjon i hardhet dette gir.

Spenningsgløding er en velkjent metode for å redusere spenninger og dermed hardheten i forbindelse med sveisede materialer. Som resultatene i kapittel 5 viser, har spenningsglødingen som ble utført på enkelte av prøvebitene i denne oppgaven, hatt en merkbar effekt på hardheten. Hardhetsverdiene i sveisemetallet sank i gjennomsnitt med 12 til 12,5 % for begge prøvetypene. En slik metode for å redusere hardheten kan virke som en rask og enkel løsning på hardhetsproblematikken. I praksis vil dette derimot være en lite gunstig metode på rørsystemene denne oppgaven tar for seg. Dette skyldes blant annet begrensninger knyttet til adkomst, logistikk, tidsforbruk og koordinering av samtidige operasjoner der sikkerhet er et overordnet mål.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Tabell 6.1 under viser en oversikt over alle testseriene med informasjon fra prosedyrer og resultater fra testing. De maksimale hardhetsverdiene til høyre i tabellen er hentet fra henholdsvis testing hos Exova, egne tester i arbeidet med denne oppgaven og teoretisk beregnede verdier. For blindhub er ikke hardhetsverdiene som ble tatt direkte på maskinert tettingsflat tatt med i betraktningen her, da disse verdiene ikke er sammenlignbare med de andre hardhetsverdiene.

Tabell 6.1: Tabell over de viktigste variablene fra sveisedokumentasjon med utvalgte testresultater

Grunn-materiale	Testserie nr.	Sveise-metode	Tilsett	Forvarme [°C]	Varme-tilførsel [kJ/mm]	Målt maks HV10	Målt maks HV0,05*	Beregnet maks HV10
Blindhub	1	TIG	A	100	0,96 – 2,06	382	327	367
Rør	2a	TIG	A	100	0,96 – 2,06	364	341	367
Stang	3a	TIG	B	200	2,0 – 2,2	265	267	246
	3b	TIG	A	200	1,21 – 1,30	320	-	361
	3c	TIG	B	75	1,36 – 1,42	314	-	316

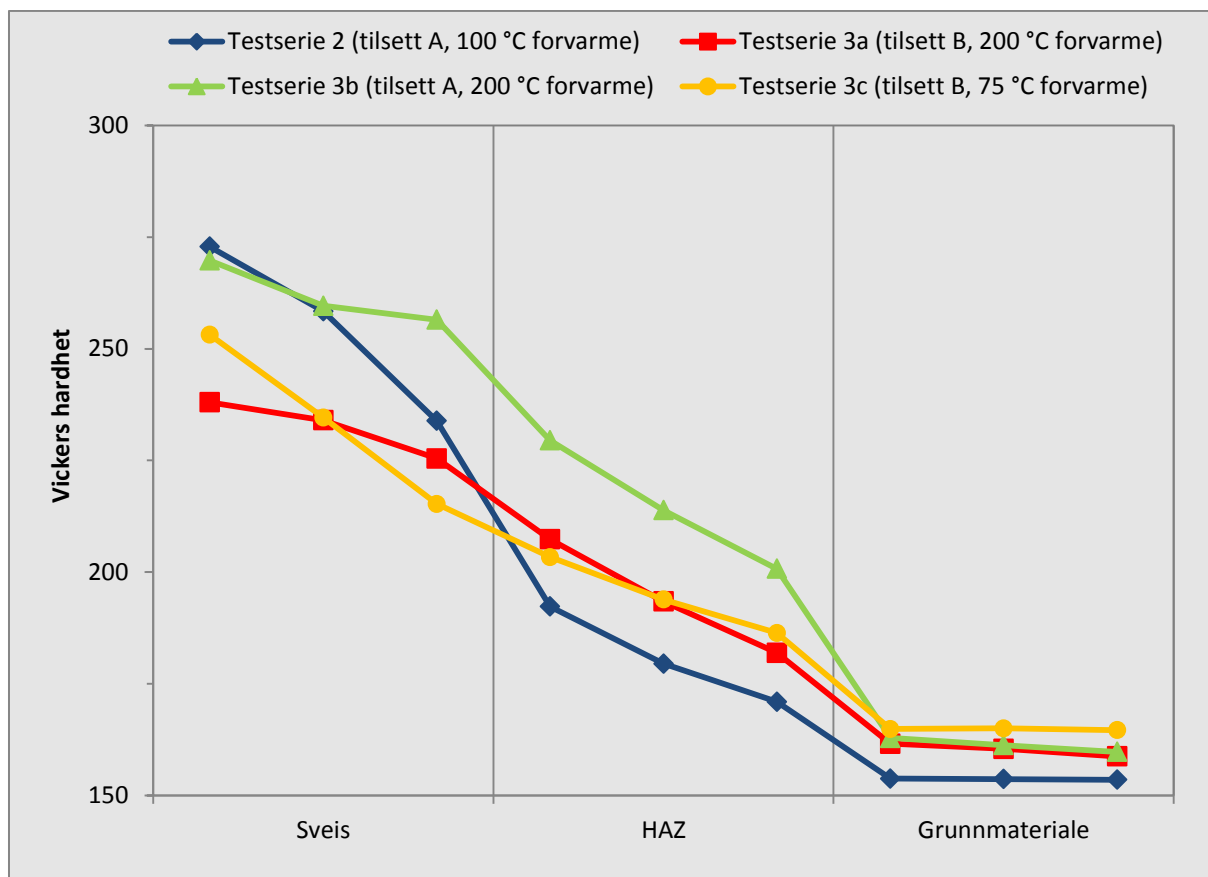
* Målinger tatt i denne oppgaven

Hvis vi sammenligner hardhetsmålinger tatt av Exova med målinger tatt i denne oppgaven og beregnede verdier, ser vi at de fleste verdiene korrelerer noenlunde med hverandre. På blindhub kan vi se at mine maksimale hardhetsmålinger avviker noe fra det som ble målt hos Exova og beregnede verdier. Dette kan ha sin årsak i at det ikke ble tatt nok målinger, samt at Vickers-diagonalene var vanskelige å måle i områder med dårlig etsing. Enkelte av bitene fra blindhub måtte etses flere ganger, da noen deler av sveis reagerte annerledes på etsingen enn andre. Dette medførte at noen områder ble veldig mørke, noe som gjorde det vanskeligere å se og vurdere konturen av intrykket.

De beregnede hardhetsverdiene stemmer godt med testene hos Exova, bortsett fra testserie 3b. Dette kan ha årsaker som at det ikke har blitt tatt nok hardhetsmålinger eller skyldes antagelser tatt ved beregning av hardhetsverdiene. For eksempel ble det antatt en virkningsgrad på 0,45 som kan tenkes å være for lav. Med en høyere virkningsgrad i beregningen for testserie 3b, ville den teoretiske hardhetsverdien blitt noe lavere. Samtidig viser hardhetsverdiene i Tabell 6.1 at modellen som ligger til grunn for de teoretiske beregningene stemmer godt med virkeligheten.

Figur 6.1 på neste side viser gjennomsnittlig hardhetsdistribusjon for testseriene 2 og 3a – c. Testserie 1 er utelatt fra diagrammet fordi datagrunnlaget er for lite til å tas med i denne sammenligningen. På blindhubben ble det kun tatt målinger gjennom ett snitt, mens de andre testseriene er gjengitt som gjennomsnitt av flere hardhetsmålinger.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål



Figur 6.1: Gjennomsnittkurve for hardhetsmålinger tatt av Exova for testserie 2, 3a, 3b og 3c

Et raskt overblikk på Figur 6.1 viser at testseriene 3a og 3c har den beste distribusjonen av hardhetsmålinger, i forhold til kravet på maks 250 HV. Fellesnevneren her er at sveisetilsett B har blitt benyttet. Måleserien, som sammen med testserie 3b, kommer dårligst ut med tanke på hardhet i sveisemetall er testserie 2. Denne testserien skiller seg ut fra de andre med at den er testet på et rør, mens de andre har blitt testet på et stangmateriale med høyere karboninnhold. Som vi ser av kurven for testserie 2 har den en nærmest overlappende hardhetsdistribusjon med testserie 3b øverst i sveisemetallet. Måleseriene skiller seg fra hverandre når de går over i varmpåvirket sone og videre til grunnmaterialet. Da et forhøyet karboninnhold ofte er synonymt med økt hardhet, kan dette være noe av forklaringen til at de to testseriene har forskjellige hardhetsverdier når man kommer lenger bort fra sveisen.

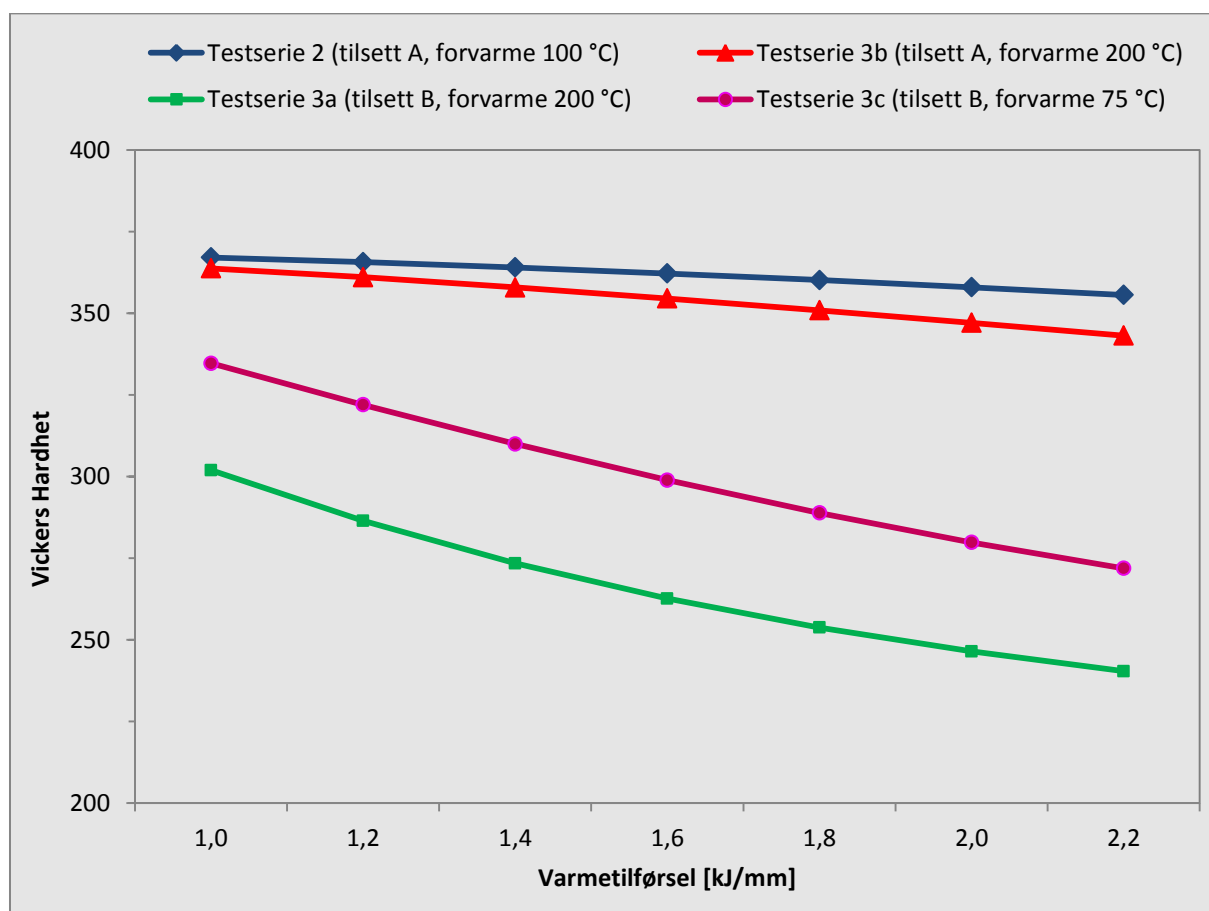
Selv om testserie 2 og 3b ser ut til å ligge ganske likt i hardhet i sveisemetallet, er det kun gjennomsnittsdistribusjonen som vises i figuren. Hvis vi ser på de maksimale målingene i hardhet begynner de å skille lag. Under testserie 2 ble det funnet en maksimal hardhet på 366 HV, noe som er 100 HV høyere enn ved testserie 3b. Det er knyttet en stor usikkerhet til målingene i denne testen, til tross for flere testrunder. I sveis har målingene et standardavvik på 32 til 37 HV.

Sammenligner man testserie 3a med testserie 3c viser resultatene tydelig at forskjellen i forvarmetemperatur har minimal innvirkning på gjennomsnittshardheten. Bakgrunnstallene for testserie 3c viser imidlertid en stor spredning i målte verdier, noe som tydelig bekrefter at en reduksjon i forvarmetemperaturen ikke er gunstig for å minimere hardheten, selv om gjennomsnittsverdiene som er vist i figuren over ligner på testserie 3a. Samtidig tyder resultatene

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

som er oppsummert i Figur 6.1 på at den kjemiske sammensetningen av sveisetilsettet kan ha vel så stor innvirkning på hardhetsverdien som forvarmetemperaturen. En sammenligning mellom testserie 3a og testserie 3b demonstrerer dette, der tilsett B viser seg å være langt mer gunstig for å minimere hardheten enn tilsett A. Av de fire seriene i Figur 6.1 har testserie 3a den laveste gjennomsnittshardheten som ligger i sveisemetallet, samt den laveste maksimale HV som er målt i dette området, på 266 HV. Dette gir grunn til å tro at sveiseparameterne som ligger til grunn for denne testserien er de mest gunstige med tanke på å minimere hardhetsverdien, av de som er blitt testet.

Betraktningene over er gjort uten tanke på forskjellen i varmetilførsel mellom måleseriene, men selv når denne tas med i vurderingen ville testserie 3a fremstått som den med best resultater. For å underbygge denne påstanden kan man gjøre en beregning tilsvarende de som er presentert i kapittel 5.5. Beregningene gir som ventet raskest avkjølingshastighet for testserie 3c, som har lavest forvarme. Allikevel kan man se av figuren under at raskest avkjøling ikke gir høyest maks hardhet. Hvis vi sammenligner testserie 3a og 3b igjen, vil en beregning av avkjølingshastighet gi lik verdi for begge testserier. Dette er grunnet at formelen for avkjølingshastighet ved tredimensjonal varmeflyt kun er avhengig av varmetilførsel, forvarmetemperatur og virkningsgrad, som er like for begge tilsett. På Figur 6.2 har testserie 3a og 3b samme avkjølingsforløp, men til tross for dette kan vi merke oss en forskjell i maks hardhet på rundt 35 HV, der testserie 3a kommer klart best ut av alle.



Figur 6.2: Beregnede hardhetsverdier for testserie 2 og 3a - c. Med en virkningsgrad på 0,45.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

Det er klart at kjemien spiller en stor rolle her. Det i betraktning kan vi nevne at tilsett A er høyere legeret enn tilsett B. Tilsett A har et totalt legeringsinnhold på 3,5 % mens tilsett B er legeret med 2,6 % legeringselementer, hvis vi ser bort fra karbon. Sammenlignet med tilsett B inneholder tilsett A 0,05 % Mo og har i tillegg et større innhold av Mn, Si, Ni og Cu. Til gjengjeld har Tilsett B 0,81 % Ti, som har en gunstig innvirkning på mikrostrukturen i sveisemetallet ved dannelse av aciculær ferritt. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 2.2.3.3. Hvis man setter legeringsinnholdet i sammenheng med et CCT-diagram, vil man ved økt innhold av legeringselementer flytte omvandlings-«nesen» på diagrammet mot høyre slik at det kreves et lengre avkjølingsforløp for å styre unna for mye dannning av martensitt. Dette kan forklare hvorfor tilsett B klarer seg bedre med rask avkjøling i forhold til tilsett A. Samtidig vil det være nødvendig med et balansert nivå av herdbarhetsselementer som Mo, Mn, Si og Ni, som tilsett A har mer av, for å favorisere dannelse av aciculær ferritt.

Mikrostrukturen har vært sammenlignet ved testinger utført i denne oppgaven. Man har da kunnet sammenligne mikrostrukturen fra blindhub, rør og stang. For blindhub og rør som ble sveiset med samme type tilsett, er mikrostrukturen betydelig mer preget av grove, tydelige nåler i form av sideplateferritt og martensitt i avsettet fra tilsett A. Testserie 3a, som er sveiset med tilsett B, har en mye jevnere mikrostruktur.

7 Konklusjon

Denne oppgaven har vist at valg av sveisetilsett og forvarmingstemperatur er avgjørende parametere for å oppnå akseptable hardhetsverdier, når spenningsgløding ikke utføres. Endringer i disse variablene gir endringer i sveisens mikrostruktur som gir direkte utslag i hardhet.

Arbeidstemperaturen kan økes for å få en mer gunstig avkjølingshastighet i sveisemetallet og varmepåvirket sone. I enkelte sammenhenger ved arbeid offshore på eksisterende rørsystemer er imidlertid ikke alltid avkjølingshastigheten like lett å kontrollere. Ved å kreve en høy arbeidstemperatur vil man skape større utfordringer for sveiseren, i og med at denne temperaturen skal opprettholdes under sveising. I denne sammenheng skal reparasjonssveisingen utføres på installasjonen, hvor man ofte har begrenset plass og tilgjengelighet.

Resultatene presentert i denne oppgaven har belyst viktigheten ved å ha et gunstig avkjølingsforløp, sammen med riktig kjemisk sammensetning i sveisetilsettet. Både ved mekanisk testing og ved bruk av formler får vi resultater som er preget av kjemiens rolle fremfor viktigheten til avkjølingshastigheten. Ved å bruke et tilsett med det riktige forholdet med legeringselementer, vil arbeidstemperaturen kunne være lavere. Sveisetilsettet som er omtalt som tilsett B i denne oppgaven har tydelig gunstige egenskaper som favoriserer dannelse av en mikrostruktur som har gode mekaniske egenskaper, og det er vist at disse kan oppstå til tross for en reduksjon i arbeidstemperaturen. Dette tilsettet har blant annet blitt brukt på testserie 3a, som er gjort på det materialet hvor man så langt har oppnådd det mest tilfredsstillende hardhetsnivået.

Visse legeringselementer vil påvirke CCT-diagrammet slik at man må ha et lengre avkjølingsforløp for å danne mikrostruktur som gir ønskede mekaniske egenskaper, og i dette tilfellet en hardhet i sveisemetallet som tilfredsstillende krav til hardhet i H₂S-holdige miljøer. Ved sveisejobber offshore vil det, praktisk og økonomisk sett, være best å finne et sveisetilsett med det optimale forholdet legeringselementer. Målet må være å klare seg med en lavest mulig arbeidstemperatur, og samtidig oppnå en hardhet som ligger under 250 HV. Samtidig er det både vanskelig og ressurskrevende både å identifisere og å fremskaffe sveisetilsett med perfekt sammensetning til ethvert formål.

Når alle disse hensynene veies opp mot hverandre må konklusjonen på oppgavens problemstilling bli at kombinasjonen av sveisetilsettets kjemiske sammensetning og sveiseprosedyrens forvarmingstemperatur må ses i sammenheng og optimaliseres som en helhet. Siden testserien hvor man så langt har oppnådd den laveste hardheten er sveiset med maksimal tillatt forvarmingstemperatur på 200 °C må anbefalingen for ytterligere forbedring av resultatet bli at man beholder dette forvarmenivået, maksimerer varmetilførselen og forsøker å fremskaffe et sveisetilsett med en liten reduksjon av P_{cm}, men som samtidig inneholder en relativt lik andel %Ti.

8 Referanser

- Almar-Næss, A. (2003). *Metalliske materialer: struktur og egenskaper* (4. utg.). Trondheim: Tapir.
- Antaki, G. A. (2005). *Fitness-for-service and integrity of piping, vessels, and tanks: ASME code simplified*. New York: McGraw-Hill.
- Arntsen, G. R. (2000). *Stålboka*. Trondheim: Tapir.
- Barka, T. M. (1985). *Grunnleggende sveiseteori: stål*. [Stavanger]: Statens teknologiske institutt, Avd. Rogaland, Sveiseseksjonen.
- Bhadeshia, H. K. D. H. (2000). Case study: Weld microstructures. *Materials Science & Metallurgy*. Retrieved from <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/C9/C9-9.pdf>.
- Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2006). *Steels: microstructure and properties*. Amsterdam: Elsevier.
- Böhler. (2008). Welding consumables for steel construction Lastet ned 21.04, 2012, fra http://www.boehler-welding.com/german/files/Steelconstr_ENG.pdf
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. New York: Wiley.
- England, G. (2008). Vickers Hardness Test Lastet ned 10.02, 2012, fra <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>
- ESAB. (2011). ESAB minilister for valg av tilsettmaterialer Lastet ned 21.04, 2012, fra <http://www.esab.no/no/no/support/upload/ESAB-Minilister-tilsettmaterialer-19-01-2011.pdf>
- Federation of European Producers of Abrasives. (2012). FEPA Abrasives Lastet ned 28.02, 2012, fra <http://www.fepa-abrasives.org/DesktopDefault.aspx?portalname=www.fepa-abrasives.org&language=E&folderindex=0&folderid=3&headingindex=5&headingid=80&tabindex=1&tabid=273>
- Grong, Ø. (1990). *Sveisemetallurgi*. Trondheim: Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole, Metallurgisk institutt.
- Grong, Ø. (1994). *Metallurgical modelling of welding*. London: Institute of Materials.
- Halmøy, E. (2007). *Sveiseteknikk*. Trondheim: NTNU, Institutt for produktutvikling og materialer.
- Johnsen, R. (2009). Enkel innføring i materialteknikk Lastet ned 24.04, 2012, fra http://www.nfv.no/fileadmin/940103_Materialvalg/Innledende_materialteknikk.pdf
- Malm Orstad. (2012). Sveis.
- Mattson, S., & Hammer, K. (2001). *Sveisemetallurgi: sveiseteknikk*. Oslo: Gyldendal yrkesopplæring.
- Microsoft.com. (2012). STDAV.S (funksjon) Lastet ned 30. mai, 2012, fra <http://office.microsoft.com/nb-no/excel-help/stdav-s-funksjon-HP010335698.aspx>
- Norwegian Technology Standards Institution. (1998). Drilling Facilities - Norsok D-001 Rev. 2. Oslo.
- Oceaneering. (2012). Product and Services Lastet ned 05.06, 2012, fra <http://www.oceaneering.com/subsea-products/grayloc/grayloc-products-and-services/>
- Olsen, A. (2002). Hardhetsprøving av metalliske materialer: Høgskolen i Vestfold.

Hardhetsproblematikk knyttet til reparasjonssveising av tetteflater på hubber og flenser i karbonstål

- Petzow, G., & Carle, V. (1999). *Metallographic etching: techniques for metallography, ceramography, plastography*. Metals Park, Ohio: ASM International.
- Porter, D. A., & Easterling, K. E. (2000). *Phase transformations in metals and alloys*. Cheltenham: Stanley Thornes.
- Simensen, P. A. (1973). *Sveising Anvendt Materialteknikk: Veritas-Kurs*.
- Sveiseteknologi AS. (2012). Sveiseprosedyre/WPS Lastet ned 06.01, 2012, fra <http://www.sveiseteknologi.no/sveiseprosedyre-wps/>
- The International Organization for Standardization. (2009). Petroleum and natural gas industries - Materials for use in oil and gas production *Part 2: Cracking-resistant carbon and low alloy steels, and the use of cast irons (ISO 15156-2)*.
- Trethewey, K. R., & Chamberlain, J. (1995). *Corrosion for science and engineering*. London: Longman.
- Weman, K. (2003). *Welding processes handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Yara Praxair. (2009a). Beskyttelsesgasser Lastet ned 22.04, 2012, fra <http://www.yarapraxair.no/gass/beskyttelsesgasser/>
- Yara Praxair. (2009b). Beskyttelsesgasser til sveising Lastet ned 22.04, 2012, fra <http://www.yarapraxair.no/Global/Norway/Brosjyrer/Sveising%20og%20skj%C3%A6ring/Beskyttelsesgasser%20til%20sveising.pdf>

9 Vedlegg

- Vedlegg A: Materialsertifikater
- Vedlegg B: Utdrag fra testsertifikat
- Vedlegg C: Tabeller fra eksperimentelt arbeid
- Vedlegg D: Utdrag fra standard

Vedlegg A: Materialsertifikater

A.1 Rør



Ordrenr: 692416

PoNo: 1494/Imenco 00566601 Itemnr: 1
HeatNr: 241314

Inspection No – Prüf-Nr – DTM 0815167/3
Certificat No – N° di collaudo
Blatt-Nr. – Sheet No –
Page-N° – Paq-N°: 1 of 1



Inspection Certificate –
Abnahmeprüfzeugnis – Certificat De Réception –
Certificato Collaudo Materiali



Customer – Besteller – Acheteur – Committente:	Part – Teil – Partie – Parte:	Incomplete
Rolf Lycke A/S Lysaker / Norway	Order No – Bestell-Nr. -N° de la commande – N° dell'ordine:	426685-2
Manufacturer – Hersteller – Fabricant – Produttore:	dated – vom – date – in data:	10.04.2008
Vallourec & Mannesmann Tubes V & M Deutschland GmbH, Düsseldorf/D	Works-No – Works Nr. – N° usine – Comessa N°:	852/45295
Article – Prüfgegenstand – Produit – Prodotto: Technical requirements/Demand – Prüfgrundlagen/Anforderungen – Spécifications techniques/ Esigences – Norma di controllo/requisiti: API Spec. 5L, PSL 2, 03.2004, Lycke Specification V&M-M-LY01, Rev. 2, 2008-01-25, NACE Standard MR 0175-2003, Paragraph 3.2 Material – Werkstoff – Matière – Materiale: according to – entsprechend – suivant – secondo: Edition – Ausgabe: Edizione: X 52 N modified as above State of delivery – Lieferzustand – Etat de livraison – Stato di fornitura: normalised Sizemaking process – Erschmelzungsart – Procédé d'élaboration – Procedimento di elaborazione: Oxygen (BOF) Inspector's stamp – Stempel des Sachverständigen – Poignon de l'expert – Marchio del collaudatore: LR		
Brand of the manufacturer – Herstellerkennzeichen – Marque du fabricant – Marchio del produttore: V&M41 Marking – Kennzeichnung – Marquage – Funzonatura: See attached works test certificate.		

Extent of material delivery – Umfang der Lieferung – Liste descriptive – Ammontare della fornitura:				
Item No. Pos. Nr. Poste N° N° pos.	Number of Stückzahl Qté Numero pezzi	Article – Gegenstand – Désignation du produit – Tipo di prodotto	Heat No Schmelz Nr. N° Coulee N° Colata	Test No Prüf Nr. N° d'éprouvette N° di prova
		Hot Finished Seamless Line Pipes (Ends bevelled, angle 30 degrees - Item 6 only) (Ends plain, square to tube axis, deburred - Items 2 and 3 only)		
2	-19-	219,1 out.dia. x 31,8 w.thickn. mm Total length: 166,56 m Weight: 24.240 kg	376855	3095
3	-16-	273 out.dia. x 38,1 w.thickn. mm Total length: 127,26 m Weight: 27.400 kg	240160	305A, 2876, 2878, 2879
6	-30-	323,9 out.dia. x 25,4 w.thickn. mm Total length: 310,11 m Weight: 56.932 kg	241314, 241318	623A, 602B, 603A.
Total pcs.	-65-	Total weight: 108.572 kg		

Additional remarks – Zusätzliche Angaben – Autres remarques – Osservazioni:

The requirements are fulfilled as per Annex. – Die gestellten Anforderungen sind lt. Anlagen erfüllt.
Les conditions imposées sont satisfaites suivant annexes. – I risultati sono conformi ai requisiti richiesti come da allegati.

Location – Ort – lieu – località Dortmund

Date – Datum – data 23 February 2009

FOR THE SURVEYORS: A. SCHWARTZ
Surveyor to Lloyd's Register EMEA
Member of the Lloyd's Register Group
(CEC Member Organisation)
Inspecting Authority – Prüfstelle – Organisme de Contrôle

Annex – Anlagen – Annexes – Allegati:
Works test certificates nos. : 70664RS08, 73106RS09 and 70667RS08.
1) Test results – Ergebnisse der Prüfungen – Résultats des essais – Risultati delle prove.
Other annexes in 1) Weitere Angaben in 1) – Autres annexes en 1) – Altri allegati in 1)

Lloyd's Register, its affiliates and subsidiaries and their respective officers, employees or agents are, individually and collectively, referred to in this clause as the 'Lloyd's Register Group'. The Lloyd's Register Group assumes no responsibility and shall not be liable to any person for any loss, damage or expense caused by reliance on the information or advice in this document or howsoever provided, unless that person has signed a contract with the relevant Lloyd's Register Group entity for the provision of this information or advice and in that case any responsibility or liability is exclusively on the terms and conditions set out in that contract.

Form 5587A (2006.07)

<p>V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Stopfen Rather Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf</p> 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	<p>INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204:2004</p> <hr/> <p>No. : 70667RS08 (A03) Page: 1 / 6 Date: 04.12.2008</p>
--	---	---

<p>(A01) V&M DEUTSCHLAND GmbH</p>	<p>(A08.1) V&M-Order-No. 85245295</p> <p>(A08.2) Suborder</p>
<p>(A08.1) Customer ROLF LYCKE AS ENERGIVEGEN 4 N-4056 TANANGER</p>	
<p>(A06.2) Orderer ROLF LYCKE A/S / BOX 10</p>	<p>(A07.2) Order-No. 426685-2 Date 10.04.2008</p>
<p>(B01, B02, B04) Description of the product</p>	<p>HOT FINISHED SEAMLESS LINE PIPE ENDS BEVELLED, ANGLE 30 DEGREES (TOLERANCE +5/-0 DEGREES), ROOT FACE 1,6 +/- 0,8 MM INSIDE WITHOUT RUST PROTECTION OUTSIDE DRY VARNISH TUBES LOOSE ITEM NO 11407400</p> <p>API SPEC. 5 L, PSL 2, 03.2004 NACE STANDARD MR 0175-2003, PARAGRAPH 3.2 LYCKE-SPECIFICATION V&M-M-LY01, REV. 2, 2008-01-25 X 52 N MOD</p> <p>NORMALIZED</p> <p>WE CONFIRM FULL COMPLIANCE WITH NACE STANDARD MR-0175 LAST EDITION AS PER NACE MR-01-75 EDITION 1997 MAXIMUM HARDNESS 22 HRC/237 HB, MAXIMUM NI CONTENT 0,01% MAXIMUM COLD FORMING 5 % CHEMICAL AND MECHANICAL VALUES ACC. TO NORSOK MDS C22 REV.3, NORSOK MDS Y27 REV.3(WITHOUT CTOD-TEST) AND EN 10225 G14 Q OR N CHEMICAL ANALYSIS AND MECHANICAL PROPERTIES FULFIL THE REQUIREMENTS OF BS7191 GRADE 355EM WITHOUT TENSION TESTS IN PWHT-CONDITION AND WITHOUT WELDABILITY TESTS</p> <p style="text-align: right;"> ATTACHMENT TO LLOYD'S REGISTER CERT. NO. DTM 0815167/3 </p>
<p>(A10) Inspection by LLOYD'S REGISTER EMEA LR-REF.-NO.: DTM 0815167</p>	

(A13) V&M Item	(A09) Cust. Item	(B14) Item text	(B26) Dimensions	(B10) Single length
6			O.D. 323,9 MM X WTH. 25,4 MM	IN RANDOM MILL LENGTH 8900 - 10900 MM

V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Stopfen Rather Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204:2004
		No. : 70867RS08 (A03) Page: 2 / 6 Date: 04.12.2008

(A13) V&M Item	(A09) Cust. Item	(B06) Quantity	(B11) Total length m	(B13) Weight kg
6		30	310,11	56,932

(C71)

HEAT CHEMICAL ANALYSIS

(B07.1) Heat	(B15) Process	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min	-	-	0.150	1.10	-	-	0.020	-	-	-	-
max	-	0.160	0.500	1.60	0.025	0.0070	0.060	0.300	0.250	0.300	0.080
241314	Oxygen (BOF)	0.130	0.350	1.47	0.011	0.0010	0.030	0.030	0.060	0.030	0.010
241318	Oxygen (BOF)	0.130	0.320	1.49	0.014	0.0010	0.028	0.040	0.090	0.050	0.010

(B07.1) Heat	V %	As %	Sn %	Ti %	Nb/Cb %	N %	Pb %	B %	Ca %	Bi %	CQ 03 %	CQ 08 %
min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max	0.080	0.0200	0.0200	0.020	0.040	0.0140	0.010	0.0005	0.0050	0.0100	.43	.25
241314	0.050	0.0030	0.0030	0.004	0.035	0.0058	<0.01	0.0003	0.0015	<0.01	.40	.23
241318	0.050	0.0030	0.0130	0.004	0.035	0.0060	<0.01	0.0004	0.0016	<0.01	.41	.23

(B07.1) Heat	EF 02 %	EF 10 %									
min	-	-									
max	0.12	0.80									
241314	0.09	0.13									
241318	0.09	0.19									

CQ 03	CAE = C + MN/6 + (CR+MO+V)/5 + (NI+CU)/15
CQ 08	CAE = C + Si/30 + (MN+CU+CR)/20 + Ni/50 + MO/15 + V/10 + 5B
EF 02	EF = V + Ti + Nb
EF 10	EF = CR + MO + Ni + CU

Heats fully killed

AL >= 2.2 X N

EF:3 V + NB = MAX.0.100%
HEAT NO.: 241314

ATTACHMENT TO LLOYD'S
REGISTER CERT. NO. DTM

UR 1516713

V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Stopfen Ralher Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204:2004
		No. : 70667RS08 (A03) Page: 3 / 6 Date: 04.12.2008

(C71)
HEAT CHEMICAL ANALYSIS

LADLE ANALYSIS: 0,085%
 CHECK ANALYSIS: 0,084%
 CHECK ANALYSIS: 0,086%
 HEAT NO.: 241318
 LADLE ANALYSIS: 0,085%
 CHECK ANALYSIS: 0,083%
 CHECK ANALYSIS: 0,084%

(C72)
PRODUCT CHEMICAL ANALYSIS

(B07.1) Heat	(C06.1) Test Piece	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
min		-	0.150	1.10	-	-	0.020	-	-	-	-
max		0.160	0.500	1.60	0.025	0.0070	0.060	0.300	0.250	0.300	0.080
241314		0.124	0.345	1.43	0.012	0.0006	0.028	0.025	0.053	0.030	0.005
241314		0.123	0.349	1.44	0.012	0.0005	0.029	0.026	0.054	0.030	0.006
241318		0.136	0.313	1.45	0.013	0.0010	0.026	0.038	0.085	0.056	0.011
241318		0.139	0.312	1.46	0.013	0.0011	0.027	0.037	0.083	0.057	0.012

(B07.1) Heat	(C06.1) Test Piece	V %	As %	Sn %	Tl %	Nb/Cb %	N %	Pb %	B %	Ca %	Bi %
min		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max		0.080	0.0200	0.0200	0.020	0.040	0.0140	0.010	0.0005	0.0050	0.0100
241314		0.052	0.0028	0.0010	0.003	0.032	0.0050	0.001	0.0001	0.0015	0.0010
241314		0.053	0.0030	0.0020	0.003	0.033	0.0052	0.001	0.0001	0.0017	0.0012
241318		0.052	0.0018	0.0110	0.003	0.031	0.0049	0.001	0.0001	0.0018	0.0013
241318		0.052	0.0018	0.0110	0.003	0.032	0.0045	0.001	0.0001	0.0018	0.0010

(B07.1) Heat	(C06.1) Test Piece	CQ 03 %	CQ 08 %	EF 02 %	EF 10 %					
min		-	-	-	-					
max		.43	.25	0.12	0.80					
241314		.39	.22	0.09	0.11					
241314		.39	.22	0.09	0.12					
241318		.41	.23	0.09	0.19					
241318		.42	.24	0.09	0.19					

APPENDIX TO THE
 INSPECTION CERTIFICATE NO. 01M
 11815167/3

CQ 03	CAE = C + MN/6 + (CR+MO+V)/5 + (NI+CU)/15
CQ 08	CAE = C + SI/30 + (MN+CU+CR)/20 + NI/60 + MO/15 + V/10 + SB

V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Stopfen Rather Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204:2004
		No. : 70667RS08 (A03) Page: 4 / 6 Date: 04.12.2008

(C72)

PRODUCT CHEMICAL ANALYSIS

EF 02	EF = V + Ti + NB
EF 10	EF = CR + MO + NI + CU

TENSILE TEST RESULTS

Type (C10.1)	ROUND TEST SPECIMEN
Test temperature (C03)	ROOM TEMPERATURE
Direction (C02)	longitudinal

(B07.1) Heat	(C00.1) Test Piece	(C10) Diameter	(C11) YS	(C12) TS	(C13) Elong.	(C14.1) Ratio					
		mm	R _{0.2} MPa	R _m MPa	Z ⁰ %	R/R _m -					
min		-	358	490	22.0	-					
max		-	531	620	-	0.88					
241314	623A	12.58	360	520	36.0	0.69					
241318	602B	12.67	375	528	36.0	0.71					
241318	603A	12.84	367	522	36.0	0.70					

IMPACT TEST RESULTS

Type (C40)	Charpy-V
Test temperature (C03)	- 50 DEGREES C
Direction (C02)	transverse

(B07.1) Heat	(C00.1) Test Piece	(C41) qcm	(C42.1) Impact1	(C42.1) Impact2	(C42.1) Impact3	(C43) Mean					
		J	J	J	J	J					
min		-	38.0	38.0	38.0	50.0					
max		-	-	-	-	-					
241314	623A	0.800	192	114	147	151					
241318	602B	0.800	203	220	167	197					
241318	603A	0.800	40,0	208	237	162					

HARDNESS TEST RESULTS

Location (C31.1)	OUTSIDE CONCERNING WALL
------------------	-------------------------

ATTACHMENT TO LLOYD'S
REGISTER CERT. NO. DTM

081518773

V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Slopfen Rather Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204-2004 No. : 70567RS08 (A03) Page: 5 / 6 Date: 04.12.2008
--	---	--

HARDNESS TEST RESULTS

(B07.1) Heat	(C00.1) Test Piece	(C31) Value HB	(C31) Value HB								
min		-	-								
max		237.0	237.0								
241314	623A	170.0	169.0								
241318	602B	161.0	160.0								

(D64)


OTHER TESTS ON PIPE

Test	Conditions	Test rate	Result
HEAT TREATMENT	NORMALIZED	5 MIN 920 DEGREES C AIR	
HYDROSTATIC TEST	207 BAR (1BAR=100KPA), HOLDING TIME 5 SEC.	EACH PIPE/ TUBE	NO LEAKAGE
APPEARANCE AND DIMENSIONS (D01)		EACH PIPE/ TUBE	SATISFACTORY

ULTRASONIC TEST FOR LONGITUDINAL DEFECTS ACC. TO ASTM A
 450/ E 213, RECTANGULAR NOTCH, NOTCH DEPTH 5% WALL
 THICKNESS, MIN 0,3MM / MAX 1,5MM, LENGTH 1" (25,4MM)
 EACH PIPE/ TUBE INSIDE AND OUTSIDE FULL LENGTH
 SATISFACTORY

(A04, B06)

MARKING, IDENTIFICATION

	DIE STAMPED ON ONE SIDE ROUND NOSE TOOLS V&M41 MONTH/YEAR X52N MOD HEAT-NO. PAINT STENCILED ON ONE SIDE V&M41 VALLOUREC & MANNESMANN MONTH/YEAR 323,8 X 25,4 125,61 X52N MOD TERMS OF DELIVERY PSL2 PROCESS OF MANUFACTURE S HN 85245295 ITEM-NO 6 PIPE NO. (TALLY-NR.) INSPECTOR'S SIGN OSLO CUSTOMER ORDER-NO. 426665-2 PORT OF DESTINATION SANDNES
---	--

(Z01)

The supplied products are in compliance with the requirements of the order

ATTACHMENT TO ULCYD'S
 PROGRAM EN GENT. NO. DTM
 08 Y 5 16 7 / 3


<p>V&M DEUTSCHLAND GmbH (A01) Werk Rath-Slopfen Rafter Kreuzweg 106 40472 Düsseldorf</p> 	 VALLOUREC & MANNESMANN TUBES Vallourec Group	<p>INSPECTION CERTIFICATE (A02) 3.2 EN 10204 2004</p> <hr/> <p>No. : 70667RS08 (A03) Page: 6 / 6 Date: 04.12.2008</p>
---	--	--

(A06, Z02, Z03, Z04)

Date	04.12.2008	
Validated by	Inspection Representative	Third Party Representative
	WARTEN 	
☎	+49(0)2119603954	
☎	+49(0)2119602216	
✉	CERTIFICATES-R5- PLUG@VMTUBES.DE	
Stamp		

This testimonial and certification respectively may neither be modified nor used for other products. Offences are regarded as falsification of documents and will be subject to criminal prosecution.

A.2 Stang

Продавец (Экспортер) Seller (Exporter)	 ЗАО "ВМЗ "Красный Октябрь" "Red October" Steel Works" S.J.S.C.	СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА 3.1 № QUALITY CERTIFICATE 3.1 No. 3322-11 согласно EN10204:2004 according to EN10204:2004										
Изготовитель Manufacture	400007 Россия, Волгоград, пр. Ленина, 110 Russia Volgograd, Lenina avenue, 110	582340										
Получатель, адрес, страна Consignee, address, country	Заказ № Order No. 50337											
BELGIUM, DU FERCO Special Steel (Europe) S. A.	Контракт № Contract No. CH 756-50508689/071-010.	Lager Avallons										
	Вагон № Freight car No. B318HE64/AK249464.											
	Стандарт Standard EN 10025-2:2004											
Количество мест: Number of packages: 2	Масса нетто, т (Mass net, t): 9,850											
	Масса брутто, т (Mass gross, t): 9,884											
Наименование товара Description of goods	HOT ROLLED ROUND BAR PEELLED MELTING IN ELECTRIC ARC FURNACE. NORMALIZED											
Идентификационный номер Item No.	Номера плавки Melt No.	Марки Steel grade	№ спец. Spec	Размеры (мм) / Dimensions (mm)			связки/пачки bundles/packages	Масса нетто (т) / Mass net (t)				
				толщ./диам. thickness, diameter	ширина/ внутр. диам. width, inner diameter	длина length		Кол-во Quantity	Вес связки t	bundles		
1	1133-135	S355J2-N	071-222	Ф220		5 500	1	3	5,000	5,000		
2	1188128	S355J2-N	071-223	Ф280		4 900	1	2	4,850	4,850		
Итого: Масса брутто, т (Mass gross, t): 9,884							2	5		9,850		
Массовая доля элементов (%) (по ковшевой пробе) (%) (according to ladle sample)												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al		
1	0.18	1.31	0.30	0.013	0.023	0.11	0.16	0.33	0.010	0.035		
2	0.20	1.28	0.28	0.014	0.028	0.14	0.19	0.15	0.030	0.030		
Идентификационный номер Item No.	Механические свойства (на образцах) Mechanical characteristics (on samples)						Твердость на образцах Hardness in samples	Термообработка образцов Heat treatment of samples	Места замеров Test location	Твердость в сост. поставки. Hardness in delivery condition	Зерно / Grain	Горюче кручен. Cold twisting
	временное сопротивление ultimate strength	предел текуч. yield point	относительное удлинение elongation	относительное сужение reduction in area	ударная вязкость impact	работа удара impact						
	N/mm ²	N/mm ²	%	%	дж(Д)/см ²	дж(Д)						
	550	359	27			29-27-26	ISO-V-20°C		156-156	8		
	530	349	28			avg 27						
							ISO-V-20°C					
2	575	381	30			31-31-29			159-159	8		
	568	374	31			avg 30						
Идентификационный номер Item No.	Неметаллические включения (баллы) Non-metallic inclusions (points) ASTM E45								Макроструктура Macrostructure			
	A		B		C		D					
	thin	thick	thin	thick	thin	thick	thin	thick	GOOD			
1									GOOD			
2									GOOD			
Идентификационный номер Item No.	Неметаллические включения Non-metallic inclusions DIN 50602											
Идентификационный номер Item No.	Коэффициент вытяжки Reduction ratio		Микроструктура Microstructure				Обезуглероживание Decarburization		Идеальный диаметр Ideal Diameter		Контроль на антисмешивание Anti-mixture control	
	QUALITY CERTIFICATE №3322-11											

5.71			
УЗК			
Ultrasonic test			
SEP 1921.84 gr3 cl C/c - good			

Экологический контроль: свободно от ртути. Проверено на отсутствие радиоактивности.
Ecological control: mercury free. Goods are non-radioactive.

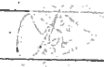
Маркировка Marking	Grev 355N.
-----------------------	------------

Примечание
Note

Сталь не является мартенситно стареющей. Steel is not martensite killed

Материал поставлен в соответствии с требованиями по качеству продукции, согласно указанному номеру контракта и спецификациям.
The materials supplied are in compliance with the quality requirements of the contract number and specification noted.

При переписке по вопросу качества ссылайтесь на № сертификата.
While corresponding concerning the quality, refer to No. certificate.

"Red October" Steel Works" C.J.S.C.		Дата Date	15 June 2011
Certificate group Inspector -	Erochina.	(Подпись) (Signature)	

A.3 Tilsett A

AS Esab**Quality Certificate** - DIN 50049 - 2.2 - DIN 50049 - 3.1 B

No. 9944-97

Buyer:
Umoe olje og gass AS

5500 HAUGESUND

Your Order No: Prøve
Your ref.: Einar Wathne
Our Order No.: Rune Pedersen

Description	Size	Part Number	Batch/Cast Number
OK TIGROD 13.26	2,4 mm		36784

 : Wire : All-Weld Metal**Chemical Analysis**

C	0,09	%	V	0,005	%	Sn	%
Si	0,84	%	Cu	0,40	%	Pb	%
Mn	1,33	%	Nb		%		%
P	0,014	%	Ti		%		%
S	0,014	%	Al	0,004	%		%
Cr	0,04	%	B		%		%
Ni	0,78	%	As		%		%
Mo	0,05	%	Sb		%	N(wire/strip)	%

Additional tests and information :The product/batch complies with specifications: **CMW-941459**

SFA/AWS A5.28-79 ER80S-G

We confirm that the 2.2 certified material has been manufactured and tested according to the same specifications and instructions as the standard product used to establish typical properties and/or ranges.

Date/Sign: Larvik, 10.09. 1997

We confirm that the 3.1 B certified results originate from ISO-testing of samples from the referenced batch, as performed and reported by the manufacturing works.

PL 10311/97

Einar Wathne

AS Esab - Quality Department
Po.Box 2050
N - 3255 Larvik
Norway

Telephone: + 47 33 12 10 00
Directline: + 47 33 12 10 56
Telefax: + 47 33 11 52 03
Member of The Esab Group

AS Esab**Quality Certificate** - DIN 50049 - 2.2 - DIN 50049 -3.1 B

No. 9932-97

Buyer:
Umoc olje og gass AS

5500 HAUGESUND

Your Order No. Prøve
Your ref.: Einar Wathne
Our Order No.: Rune Pedersen

Description	Size	Part Number	Batch/Cast Number
OK TIGROD 13.26	2,0 mm		36783

 : Wire : All-Weld Metal**Chemical Analysis**

C	0,08	%	V	0,007	%	Sn	%
Si	0,83	%	Cu	0,40	%	Pb	%
Mn	1,32	%	Nb		%		%
P	0,015	%	Ti		%		%
S	0,015	%	Al	0,004	%		%
Cr	0,03	%	B		%		%
Ni	0,80	%	As		%		%
Mo	0,04	%	Sb		%	N(wire/strip)	%

Additional tests and information :

The product/batch complies with specifications: CMW-941459

SFA/AWS A5.28-79 ER80S-G

We confirm that the 2.2 certified material has been manufactured and tested according to the same specifications and instructions as the standard product used to establish typical properties and/or ranges.

Date/Sign: Larvik, 12.09. 1997

DR. AD EDGAR

We confirm that the 3.1 B certified results originate from ISO-testing of samples from the referenced batch, as performed and reported by the manufacturing works.

Rune Pedersen

AS Esab - Quality Department
Po.Box 2050
N - 3255 Larvik
Norway

Telephone: + 47 33 12 10 00
Directline: + 47 33 12 10 56
Telefax: + 47 33 11 52 03
Member of The Esab Group

A.4 Tilsett B

AIBEL
Weld. Tech. Dept.
MOTTATT
AIBEL
Weld. Tech. Dept.
Date: 24/10-2011 Sign: *Thomas Liabo*



AIBEL AS

Att. Central Invoicing Dep. P
4066 STAVANGER
NORWAY

Inspection certificate 3.1

Inspection certificate 3.1
as per: EN 10204
No.: 43-2011-14-2159241
Rev. 0 Page: 1 of 1

Pur. order no.	4500125040	of	19.10.2011	284464												
PO No.	1041034806															
Dispatch note/pos./Split	2041044345 / 0010 / 000010	of	19.10.2011													
Test object	welding rod			10255												
Trade designation	BOEHLER EML 5			X207EW												
Marking of product																
Standard designation	EN ISO 636-A - W 46 5 W2Si / AWS A5.18-05: ER70S-3															
Dimension	2.00 x 1000 mm (.079" x 39")															
Batch	733126															
Deliv. qty.	20 KG															
Requirements																
Chemical composition in %																
rod																
Batch	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Ti	Al				
733126	0.105	0.56	1.15	0.013	0.006	0.04	0.00	0.01	0.004	0.01	0.081	0.003				
Tensile test as per EN 10002-1					Specimen preparation EN 876											
	Test temp. T	Yield point ReH	Yield strength Rp	Tensile strength Rm	Elongation A	Reduction Z	Note									
	°C	MPa	0.2% MPa 1.0%	MPa	% Lo=5d	%										
Minimum	20		460	530	23											
Maximum				680												
Impact test as per EN 10045-1					Specimen preparation EN 875 VWT 0/b											
	Test temp. T	Absorbed energy minimum values KV	Average	Lateral expansion	Shear fracture	Note										
	°C	J	J	mm	%											
	20	130														
	-50	47														

Note

Loc. Avesta Date 19.10.2011

This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

Authorized inspection representative

Hans Astrom

Böhler Welding Group Nordic AB
Box 501
Kopparåsen
SE-774 27 AVESTA
Sweden
Tel: +46 (0) 226 81500
Fax: +46 (0) 226 81575

www.bwgnord.csales.com

Vedlegg B: Utdrag fra testsertifikat

Test 1b - tatt i snitt A og B uten sliping av flaten

	A		B		A		B	
Sveis	348	Sveis	464	Sveis	348	Sveis	464	
	354		421		421			
	317		390		390			
	441		441					
HAZ	294		437		437		Snitt:	441
			311		311		340	437
			317		317		311	
Grunnmateriale	240		330		330			317
					330			330
								333
					405			
					390			
					319			
					366			
					360			
					345			
					366			
					354			
					387			
					417			
				HAZ	294			
				Grunnmateriale	240			

Test 1c – tatt i snitt A' på slipt flate

	A'
Sveis	354
	359
	358
HAZ	256
	217
	175
Grunnmateriale	160
	160
	161

B.2 Testserie 2 - Rør**Test 2a – snitt A – D**

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	354	239	270	281	286
	346	246	260	239	273
	313	257	256	259	271
HAZ	229	228	240	247	236
	196	192	230	230	212
	177	168	185	226	189
Grunnmateriale	153	149	154	160	154
	155	154	151	152	153
	150	155	154	154	153

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	323	304	283	263	293
	329	282	286	218	279
	337	270	276	260	286
HAZ	230	214	223	244	228
	198	193	214	208	203
	168	178	180	199	181
Grunnmateriale	153	152	158	166	157
	150	153	153	168	156
	153	158	154	168	158

Test 2b – snitt A – D

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	245	259	241	238	246
	258	268	224	239	247
	220	224	210	204	215
HAZ	165	174	180	180	175
	165	165	161	170	165
	157	164	164	167	163
Grunnmateriale	153	154	147	153	152
	152	149	150	151	151
	154	152	150	152	152

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	298	247	274	254	268
	288	231	216	236	243
	209	199	202	197	202
HAZ	166	168	165	168	167
	165	164	163	162	164
	165	153	158	167	161
Grunnmateriale	154	151	152	152	152
	155	155	155	157	156
	150	153	152	153	152

Test 2c – snitt A – D

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	286	265	258	267	269
	268	235	250	237	248
	224	210	215	207	214
HAZ	189	174	176	174	178
	170	166	167	167	168
	164	167	164	168	166
Grunnmateriale	155	150	151	154	153
	153	153	151	155	153
	151	153	152	152	152

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	251	202	224	276	238
	267	243	246	250	252
	224	201	203	190	205
HAZ	182	169	165	169	171
	166	162	162	165	164
	171	165	164	171	168
Grunnmateriale	154	152	152	157	154
	153	149	151	154	152
	152	155	147	153	152

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	267	360	311	316	314
	237	268	283	250	260
	210	222	223	247	226
HAZ	168	176	179	176	175
	168	165	172	170	169
	161	167	168	166	166
Grunnmateriale	154	154	154	152	154
	151	155	155	153	154
	151	158	153	149	153

	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Sveis	261	263	287	256	267
	249	257	285	246	259
	214	206	236	207	216
HAZ	176	163	189	163	173
	164	164	171	164	166
	164	161	168	166	165
Grunnmateriale	155	153	156	156	155
	158	154	153	157	156
	157	157	152	152	155

Test 2d – snitt E1 og E2

	E1	E2	Gjennomsnitt av E1 og E2
Sveis	274	290	282
	281	270	276
	283	311	297
	287	274	281
	276	366	321
	274	325	300
	311	314	313
	314	276	295
	351	306	329
	339	306	323
	314	309	312

B.3 Testserie 3a - Stang

	A	B	C	D	A	B
Sveis	235	228	259	218	234	229
	217	230	248	221	265	240
	204	219	205	235	211	256
HAZ	190	195	196	195	235	220
	180	182	179	198	188	221
	181	182	179	193	161	178
Grunmateriale	171	165	162	168	153	152
	172	165	162	166	155	150
	161	166	156	165	155	153

	A	B	C	D	A	B
Sveis	238	237	252	233	246	247
	219	221	256	232	224	235
	225	217	231	257	222	223
HAZ	210	199	218	199	226	205
	192	191	206	198	206	180
	181	185	189	198	184	172
Grunmateriale	161	165	169	160	156	157
	157	159	164	163	156	156
	156	158	166	161	155	153

B.4 Testserie 3b - Stang

	A	B	C	D	E	F	G	H	Gjennomsnitt	SD		I	J	Gjennomsnitt	SD
Sveis	250	248	241	257	288	288	320	266	270	27		162	166	164	3
	265	250	226	241	285	281	259	270	260	20		169	169	169	0
	258	255	223	239	278	268	273	258	257	18		165	170	168	4
HAZ	222	228	223	228	244	233	225	233	230	7		248	176	212	51
	203	202	209	225	215	207	209	241	214	13		254	215	235	28
	191	192	189	211	195	200	196	232	201	14		240	225	233	11
Grunmateriale	159	156	159	169	160	162	164	174	163	6		223	229	226	4
	157	159	157	167	157	161	161	171	161	5		222	235	229	9
	156	157	154	168	156	155	163	169	160	6		218	270	244	37
												219	299	259	57
												208	261	235	37
												207	262	235	39
												203	296	250	66
												204	230	217	18
												203	294	249	64
												199	266	233	47
												203	238	221	25
												194	242	218	34
												208			

B.5 Testserie 3c – Stang

	A	B	C	D	E	F	G	H	Gjennomsnitt	SD		I	J	Gjennomsnitt	SD
Sveis	245	255	247	241	274	244	246	273	253	13		163	196	180	23
	234	240	234	229	248	233	230	229	235	7		165	195	180	21
	210	220	211	213	223	225	208	212	215	6		169	203	186	24
HAZ	202	203	213	203	199	203	201	203	203	4		168	213	191	32
	192	183	209	204	198	179	195	191	194	10		171	219	195	34
	197	177	193	206	177	175	181	185	186	11		175	218	197	30
Grunnmateriale	159	163	172	166	161	160	166	172	165	5		175	221	198	33
	160	163	168	168	160	165	168	168	165	4		257	228	243	21
	170	164	170	165	153	160	165	170	165	6		294	236	265	41
												314	227	271	62
												305	181	243	88
												303	174	239	91
												230	169	200	43
												197	165	181	23
												199	162	181	26
												194	168	181	18
												198	166	182	23
												199	167	183	23

Vedlegg C: Tabeller fra eksperimentelt arbeid

C.1 Testserie 1 – Blindhub

Testserie 1.1 – Hardhetsdistribusjon i sveisemetall (før og etter spenningsgløding)

Avstand [mm]	Måling nr	C1 - Før spenningsgløding			C2 - Etter spenningsgløding			Usikkerhet
		d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	
0,5	1	18,9	20,2	242,6	18,6	19,1	260,9	7,6
1,5	2	17,1	17,1	317,1	19,3	19,6	245,1	7,6
2,5	3	19,7	19,5	241,4	17	18	302,8	7,6
3,5	4	17,6	16,9	311,6	18,4	18,1	278,4	7,6
4,5	5	16,9	17,5	313,4	21	19,9	221,7	7,6
5,5	6	17	16,7	326,6	19,9	20,1	231,8	7,6
6,5	7	20,2	20,7	221,7	20	20,6	225	7,6
7,5	8	17,4	17,4	262,3	19,6	19,3	245,1	7,6
8,5	9	19,2	19,2	251,5	20,1	20,4	226,1	7,6
9,5	10	17,4	17,3	308	19,3	19,2	250,2	7,6
10,5	11	19,4	19,4	246,4	19,2	20,1	240,1	7,6
11,5	12	17,4	17,4	306,2	18,2	18,3	278,4	7,6
12,5	13	17,5	18,2	291	20,2	19,4	236,5	7,6
13,5	14	17,5	17,8	297,6	19,6	20,1	235,3	7,6
14,5	15	18,8	19,4	254,2	21,7	20,6	207,3	7,6
15,5	16	19,8	20,1	233	21,2	21,1	207,3	7,6

Testserie 1.2 – Hardhetsdistribusjon på tvers av sveisesonen (før og etter spenningsgløding)

Avstand [mm]	C1 (Før spenningsgløding)													Før spennings- gløding	SD	Usikker- het			
	Måling nr	2			6			10			14								
		d1	d2	Data	d1	d2	Data	d1	d2	Data	d1	d2	Data						
1	1	17,1	17,1	317,1	17	16,7	326,6	17,4	17,3	308	17,5	17,8	297,6	312,3	12,4	14,6			
	2	17,7	17,5	299,3	17,4	17,1	311,6	17,6	18,2	289,4	17,1	18,2	297,6				299,5	9,2	11,9
2	3	17,3	19	281,5	23,2	23,2	175,3	21	21	219,6	19,7	20,2	233	227,4	43,7	44,4			
	4	19,8	20,3	230,6	23,4	24,5	161,6	21,7	23,2	184	22,2	22,8	183,2	189,9	29,1	30,1			
	5	19,9	20,4	228,4	22,7	23,1	176,8	21,4	21,5	201,5	20,8	23,5	189	198,9	22,1	23,4			
3	6	22,1	22,6	185,6	24,4	24,8	153,2	24,1	25	153,8	22,6	22,6	181,5	168,5	17,4	19,0			
	7	23,7	23,7	167,9	24	24,9	155,1	23	24,4	165,1	23	24,4	165,1	163,3	5,6	9,5			
4	8	23,3	23,3	170,8	24	24,4	158,3	23,9	25,7	150,8	23,5	24,4	161,6	160,4	8,3	11,3			
	9	23,5	24,8	152,6	24,7	24,9	150,8	24,6	24,8	152	26,2	26,2	135,1	147,6	8,4	11,3			
5	10	25	26,5	139,8	23,6	25,1	156,4	23,8	23,8	163,7	24,3	25,8	147,8	151,9	10,4	12,9			
	11	24,2	24,2	158	23,6	24,3	161,6	23,8	24,4	159,6	26,2	24,6	143,7	155,7	8,2	11,2			
Avstand [mm]	C2 (etter spenningsgløding)													Etter spennings- gløding	SD	Usikker- het			
	Måling nr	2			6			10			14								
		d1	d2	Data	d1	d2	Data	d1	d2	Data	d1	d2	Data						
1	1	19,3	19,6	245,1	19,9	20,1	231,8	19,3	19,2	250,2	19,6	20,1	235,3	240,6	8,5	11,4			
	2	18,8	18,8	263,3	21,6	22	195,1	20	19,8	234,1	19,2	19,1	252,8				236,3	30,0	31,0
	3	19,9	20,6	226,1	22,1	22,1	189,8	19,8	20,3	230,6	20,5	21,1	214,3				215,2	18,3	19,8
2	4	20,9	23,1	191,6	24	23,8	163,7	23,4	22,9	173	20,8	20,3	219,6	187,0	24,6	25,8			
	5	21,4	21,7	199,7	24	24,4	158,3	23,5	24,4	161,6	22,1	23	182,3	175,5	19,3	20,8			
3	6	21,8	22	193,4	25,4	25,8	141,5	24,5	24,6	153,8	24,2	24,5	156,4	161,3	22,4	23,6			
	7	22,3	22,9	181,5	23,9	23,7	163,7	25,1	25,1	147,2	25,2	24,1	152,6	161,3	15,1	17,0			
4	8	24,2	24,1	159	26,6	26,5	131,5	24	24,5	157,7	24,2	24,4	157	151,3	13,2	15,3			
	9	24,1	24,2	159	25,4	24,8	147,2	25,5	24,9	146	26,6	25,3	137,7	147,5	8,8	11,6			
5	10	26	25,7	138,8	24	24,8	155,7	26	26,4	135,1	27,1	25,6	133,5	140,8	10,2	12,7			
	11	24,2	26,1	146,6	24,8	25,1	148,9	26,6	26,9	129,6	26,2	26,4	134	139,8	9,4	12,1			

C.2 Testserie 2 – Rør

Testserie 2.1 – Hardhetsdistribusjon i sveisemetall (før og etter spenningsgløding)

Måling nr:	Avstand [mm]	D2			D3			D5			D6			D8			D9			Før spenningsgløding	SD	Usikkerhet
		d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
1	0,25	21,7	21,2	201,5	20,5	20,4	221,7	17,9	17,8	291,0	18,0	17,4	296,0	20,2	18,5	247,6	17,5	18,4	287,8	257,6	40,1	40,8
2	1,25	19,4	19,5	245,1	20,3	20,9	218,5	17,3	17,3	309,8	17,6	18,5	284,6	18,8	20,0	246,4	18,4	18,1	278,4	263,8	33,1	33,9
3	2,25	19,2	19,7	245,1	18,6	20,1	247,6	18,3	19,2	263,7	19,3	18,4	260,9	20,0	19,0	243,8	18,6	18,1	275,4	256,1	12,6	14,7
4	3,25	18,4	18,3	275,4	21,3	20,2	215,3	19,7	19,2	245,1	19,1	18,7	259,6	18,9	18,3	268,0	18,6	19,2	259,6	253,8	21,4	22,7
5	4,25	19,5	18,7	254,2	19,1	21,0	230,6	19,7	19,2	245,1	17,5	17,2	308,0	17,0	17,0	320,8	18,1	18,4	278,4	272,9	36,0	36,8
6	5,25	20,1	20,3	227,2	21,2	20,8	210,2	18,1	18,4	278,4	16,8	17,2	320,8	17,5	18,5	286,2	18,1	18,6	275,4	266,4	40,7	41,4
7	6,25	19,0	19,2	254,2	19,8	18,6	251,5	18,3	18,3	276,9	19,6	19,6	241,4	20,7	19,3	231,8	19,8	19,5	240,1	249,3	15,8	17,5
8	7,25	20,4	20,8	218,5	21,1	22,6	194,2	17,1	17,5	309,8	18,0	17,1	301,0	20,4	19,6	231,8	18,3	18,8	269,5	254,1	46,7	47,3
9	8,25	18,0	20,1	255,5	20,0	18,7	247,6	17,8	17,9	291,0	19,4	18,6	256,8	17,7	17,2	304,5	17,2	18,1	297,6	275,5	24,9	26,0
10	9,25	19,5	18,3	259,6	19,0	19,4	251,5	20,6	19,8	227,2	18,7	18,4	269,5	18,6	16,6	299,3	18,1	19,9	256,8	260,7	23,6	24,8
11	10,25	20,8	21,3	209,3	23,1	21,7	184,8	19,7	18,3	256,8	20,3	20,3	230,6	18,9	16,6	294,3	17,0	17,1	319,0	249,1	51,1	51,7
12	11,25	20,9	19,9	222,8	20,9	21,0	211,3	18,6	18,8	265,1	20,5	20,0	226,1	16,3	17,1	332,5	20,8	20,6	216,4	245,7	46,6	47,2
13	12,25	19,4	18,8	254,2	17,4	18,1	294,3	18,3	18,2	278,4	17,7	17,6	297,6	16,4	16,6	340,6	19,3	19,6	245,1	285,0	34,4	35,2
14	13,25	20,2	19,5	235,3	16,8	17,5	315,2	19,8	19,3	242,6	19,1	19,2	252,8	18,4	17,6	286,2	19,0	19,7	247,6	263,3	30,9	31,9
15	14,25	22,1	21,2	197,8	18,3	19,0	266,6	18,5	19,7	254,2	20,8	18,9	235,3	18,5	19,5	255,5	17,7	18,8	278,4	248,0	28,4	29,4
Gjennomsnitt:		237,0			237,4			269,0			269,4			279,3			268,4					

Vedlegg

D4			D7			E4			E7			Etter spenningsgløding	SD	Samlet feil
d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
22,4	22,2	186,5	20,6	20,9	215,3	20,1	19,9	231,8	24,8	26,3	142,0	193,9	39,3	40,1
20,4	20,2	225,0	18,9	18,9	259,6	18,6	18,8	265,1	18,7	18,7	265,1	253,7	19,3	20,8
19,8	19,8	236,5	19,7	19,9	236,5	20,8	19,9	223,9	20,1	20,0	230,6	231,9	6,0	9,7
22,2	20,7	201,5	23,0	22,1	182,3	19,6	19,3	245,1	18,9	19,7	248,9	219,5	32,8	33,7
19,9	20,0	233,0	20,0	20,7	213,3	19,6	20,0	236,5	22,8	24,4	166,5	212,3	32,2	33,1
22,9	21,3	189,8	19,2	19,7	245,1	18,6	18,7	266,6	19,1	19,5	248,9	237,6	33,2	34,1
21,9	22,8	185,6	20,0	20,1	230,6	20,2	21,0	218,5	19,8	19,1	245,1	220,0	25,4	26,5
20,0	19,6	236,5	20,3	20,9	218,5	19,3	18,3	262,3	21,7	21,6	197,8	228,8	27,4	28,4
20,9	21,1	210,2	19,0	18,8	259,6	19,8	19,4	241,4	19,9	18,9	246,4	239,4	20,9	22,3
18,9	19,6	250,2	20,3	20,9	218,5	22,8	24,8	163,7	22,1	21,7	193,3	206,4	36,8	37,6
19,5	20,0	237,7	21,5	20,7	208,3	20,4	19,9	228,4	19,4	20,1	237,7	228,0	13,9	15,8
19,2	18,6	259,6	19,3	19,1	251,5	18,9	18,4	266,6	20,1	20,8	221,7	249,9	19,8	21,2
18,6	19,4	256,8	21,0	20,5	215,3	19,3	19,0	252,8	20,5	21,3	212,3	234,3	23,8	24,9
19,8	19,5	240,1	19,6	18,4	256,8	19,5	19,9	238,9	26,8	25,6	135,1	217,7	55,7	56,2
19,0	18,7	260,9	19,7	20,9	225,0	20,7	21,1	212,3	19,0	18,8	259,6	239,5	24,6	25,7
227,3			229,1			236,9			216,7					

Testserie 2.2 – Hardhetsdistribusjon på tvers av sveisesonen (før og etter spenningsgløding)

	D2			D5			D6			D9			Før spenningsgløding	SD	Usikker- het
Måling nr:	4			6			12			12					
Avstand [mm]	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
0,5	17,7	18,2	287,8	16,7	17,6	315,2	17,6	16,5	319,0	19,2	20	243,8	291,5	34,7	35,5
1,5	18,4	18,3	275,4	18,1	18,4	278,4	20,5	20,0	226,1	20,8	21	216,4	249,1	32,4	33,3
2,5	20,1	21	219,6	18,2	19,3	263,7	18,2	18,7	272,4	20,4	21	216,4	243,0	29,1	30,1
3,5	20,6	21,2	212,3	22,3	22,3	186,5	22,2	22,4	186,5	21,9	22	196,9	195,6	12,2	14,4
4,5	22,9	22,8	177,6	22,6	21,1	194,2	24,6	24,4	154,5	24,2	25	155,1	170,4	19,2	20,6
5,5	25,2	25,2	146	24,5	24,3	155,7	24,6	24,4	154,2	22,9	24	167,9	156,0	9,0	11,8
6,5	23,4	24,1	164,4	24	24,2	159,6	24,5	25,1	150,8	23,4	24	164,4	159,8	6,4	10,0
7,5	24,5	25	151,4	24,5	25,5	148,4	26,4	25,6	137,2	26,2	25	140,9	144,5	6,6	10,1
8,5	25,8	25,2	142,6	25,3	25,5	143,7	24,5	25	151,4	25,3	24	152,6	147,6	5,2	9,2

	D4			D4			D7			D7			Etter spenningsgløding	SD	Usikker- het
Måling nr:	6			12			4			14					
Avstand [mm]	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
0,5	19,8	18,9	247,6	20	20,2	229,5	18,4	18,8	268	19,9	18,1	256,8	250,5	16,3	18,0
1,5	22,9	21,3	189,8	19,2	18,6	259,6	23,0	22,1	182,3	19,6	18,4	256,8	222,1	41,8	42,5
2,5	21,2	20,8	210,2	20,5	19,7	229,5	20	19,7	235,3	22,1	22,1	189,8	216,2	20,6	22,0
3,5	20,9	20,9	212,3	22,5	22,4	184,0	24,8	25	149,5	23,4	22	179,9	181,4	25,7	26,8
4,5	23,5	24,5	161	21,6	21,9	196,0	23,1	22,8	176	25,1	24,9	148,4	170,4	20,5	21,9
5,5	24,4	24,3	156,4	26,2	26,0	136,1	26,6	24,1	144,3	26,0	25,5	139,8	144,2	8,8	11,7
6,5	26,1	27,2	130,6	25,9	25,7	139,3	24,9	24,2	153,8	23,9	25,6	151,4	143,8	10,8	13,2
7,5	26,2	27,3	129,6	27	26,0	132,0	26,8	28	123,1	25,4	24,6	148,4	133,3	10,8	13,2
8,5	27,6	27,3	123,1	26,7	25,7	135,1	24,4	26,4	143,7	25,3	24,8	147,8	137,4	10,9	13,3

C.3 Testserie 3a – Stang

Testserie 3.1 – Hardhetsdistribusjon i sveisemetall

Avstand [mm]	Måling nr	A5			A6			B5			B6			Gjennomsnitt av målinger	SD	Usikker- het
		d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
0,5	1	20,9	20,1	220,6	21,9	20,0	201,5	21,2	21,6	202,5	21,3	20,5	212,3	209,2	9,0	11,8
	2	20,8	20,3	219,6	20,4	20,6	220,6	21,1	21,1	208,3	21,1	20,2	217,4	216,5	5,6	9,5
2,5	3	20,5	21,5	210,2	21,5	20,4	211,3	19,8	20,7	226,1	21,1	20,5	214,3	215,5	7,3	10,5
	4	19,7	20,2	233,0	20,9	20,6	215,3	19,1	18,6	260,9	20,5	18,7	241,4	237,7	18,9	20,4
4,5	5	19,3	18,8	255,5	20,5	20,6	219,6	21,4	20,4	212,3	21,6	21,6	198,7	221,5	24,2	25,4
	6	20,9	20,7	214,3	20,1	20,1	229,5	20,4	20,6	220,6	20,8	20,6	216,4	220,2	6,7	10,2
6,5	7	22,0	21,8	193,3	20,6	20,8	216,4	21,6	20,1	213,3	21,3	20,8	209,3	208,1	10,3	12,8
	8	20,4	19,3	135,3	22,5	23,2	177,6	19,6	19,2	246,4	20,2	20,5	223,9	195,8	49,5	50,1
8,5	9	20,4	20,2	225,0	21,1	21,5	204,4	19,1	18,4	263,7	19,5	19,3	246,4	234,9	25,8	26,9
	10	20,0	19,9	233,0	20,4	20,6	220,6	19,4	19,4	246,4	20,7	21,1	212,3	228,1	14,9	16,7
10,5	11	18,9	19,1	256,8	20,3	20,3	225,0	25,6	26,5	136,6	21	20,3	217,4	209,0	51,2	51,7
	12	20,0	20,5	226,1	19,8	19,1	245,1	21,3	19,4	223,9	21,7	20,7	206,3	225,4	15,9	17,6
12,5	13	20,7	19,7	227,2	23,6	23,9	164,4	19,5	19,3	246,4	19,1	19,3	251,5	222,4	40,0	40,8
	14	20,3	20,2	226,1	22,6	22,2	184,8	19,9	20,7	225	21,4	19,8	218,5	213,6	19,5	20,9
14,5	15	21,9	21,4	197,8	21,0	19,7	223,9	20,8	20	222,8	22,2	20,7	201,5	211,5	13,8	15,7
	16	22,2	20,7	201,5	19,0	18,9	258,2	19,9	19,7	236,5	20,3	20,7	220,6	229,2	24,1	25,2
Gjennomsnitt:		217,2			213,6			224,5			219,3					

Testserie 3.2 – Hardhetsdistribusjon på tvers av sveisesonen

Avstand [mm]	A5						A6						Gjennomsnitt av målinger	SD	Usikkerhet
	5			11			8			16					
	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA	d1	d2	DATA			
0,5	18,4	18,9	266,6	18,3	19,4	260,9	21,2	20,5	213,3	20,6	19,9	226,1	241,7	26,1	27,2
	19,3	18,8	255,5	18,9	19,1	256,8	22,5	23,2	177,6	19,0	18,9	258,2	237,0	39,6	40,4
2,5	21,4	21	206,3	19,7	20,5	229,5	21,2	21,4	204,4	20,6	20,3	221,7	215,5	12,1	14,3
	21,1	21,6	203,4	21	20,8	212,3	21,8	22,1	192,4	22,1	21,7	193,3	200,4	9,4	12,1
4,5	22,9	22	184	22,5	22,4	184,0	23,4	23,4	169,3	22,3	22,5	184,8	180,5	7,5	10,7
	23	23	175,3	23	23,3	173,0	23	23,1	174,5	23	23	175,3	174,5	1,1	7,7
6,5	22,9	22,7	178,4	24,1	24,5	157,0	24,5	23,7	159,6	22,1	23,2	180,7	168,9	12,4	14,5
	23	22,2	181,5	22,4	22,0	188,1	22,6	22,9	179,1	22,8	22,3	182,3	182,8	3,8	8,5
8,5	23,2	23,6	169,3	23,1	22,7	176,8	23,3	23,5	169,3	22,3	21,9	189,8	176,3	9,7	12,3
	25,6	23,1	156,4	22,8	22,8	178,4	26,6	26,2	133,0	25	23,3	159	156,7	18,6	20,1
10,5	25,9	25,8	138,8	25,9	25,3	141,5	24,2	24,3	157,7	24,1	23,4	164,4	150,6	12,4	14,6

Vedlegg D: Utdrag fra standard

D.1 Fra ISO 15156-2 (2009), side 20

Table A.1 – Maximum acceptable hardness values for carbon steel, carbon-manganese steel and low-alloy steel welds

Hardness test methods	Hardness test location for welding procedure qualification	Maximum acceptable hardness
Vickers HV 10 or HV 5 or Rockwell HR 15N	Weld root: Base metal, HAZ and weld root as shown in figures 2, 3 or 4	250 HV 70,6 HR 15N
	Base metal and HAZ for weld overlays as shown in figure 6; see also A.2.1.5 b)	250 HV 70,6 HR 15N
	Weld cap: Base metal, HAZ and weld metal of unexposed weld cap as shown in figures 2 or 4	275 HV ^a 73,0 HR 15N
Rockwell HRC; see 7.3.3.2	As shown in Figure 5	22 HRC
	Base metal and HAZ for weld overlays as shown in Figure 6; see also A.2.1.5 b)	22 HRC
^a The maximum shall be 250 HV or 70,6 HR 15N unless <ul style="list-style-type: none"> - the equipment user agrees the alternative weld cap hardness limit; and - the parent material(s) are over 9 mm thick; and - the weld cap is not exposed directly to the sour environment 		

For påleggsveis skal det ved kvalifisering av sveiseprosedyrer ifølge ISO 15156-2 (2009) brukes Vickers HV 10 eller HV 5 som hardhets testing,

D.2 ASME B31.3: Requirements for heat treatment (spenningsgløding)

Base Metal P-No. or S-No. [Note (1)]	Weld Metal Analysis A-Number [Note (2)]	Base Metal Group	Nominal Wall Thickness		Specified Min. Tensile Strength, Base Metal		Metal Temperature Range		Holding Time		
			mm	in.	MPa	ksi	°C	°F	Nominal Wall [Note (3)]		Min. Time, hr
									min/mm	hr/in.	
1	1	Carbon steel	≤ 20	≤ ¾	All	All	None	None
			> 20	> ¾	All	All	593–649	1,100–1,200	2.4	1	1