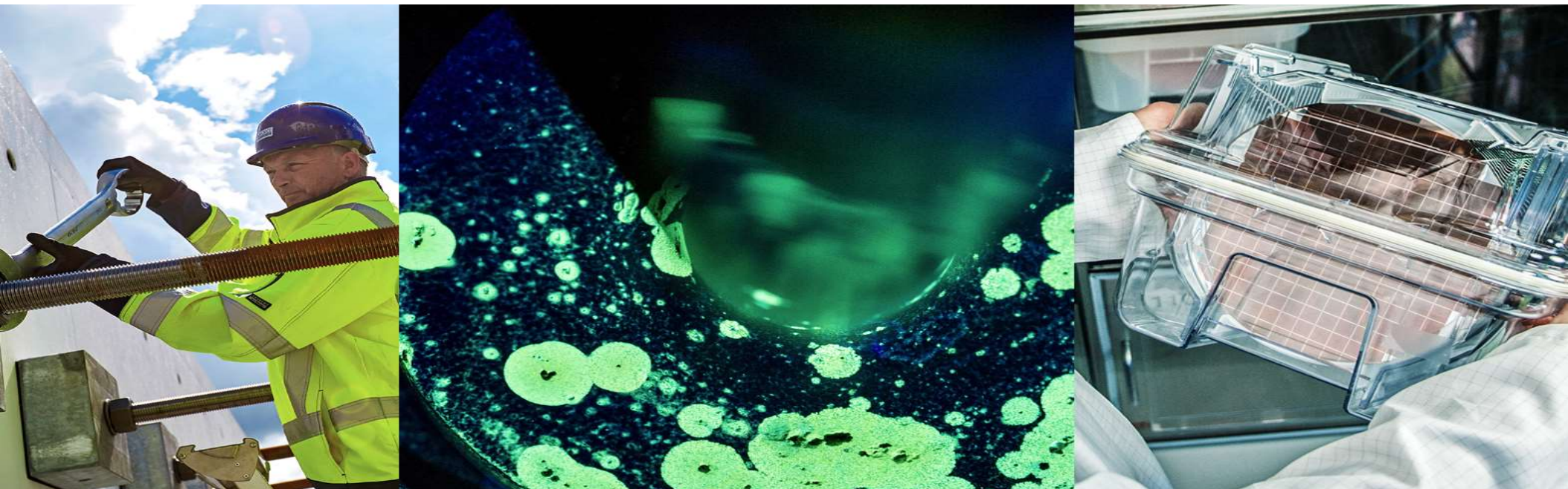




DANSK STÅLDAG 2019 Brintrevner i svejsninger

Hvad er det ? Hvordan opstår de ? Hvad betyder de? Hvordan kan de undgås?

Peter Krabbe-Christensen FORCE Technology Engineering og strukturanalyse

Peter Krabbe-Christensen

PKC@force.dk



Brint revner /Kold revner Relevans?

Strukturel sikkerhed reduceres, reparationer er fordyrende og forsinkende

Udmattelseslevetid forkortes væsentligt på grund af "startrevne".

Modstandsevne mod Sprødbrud mindskes på grund af forekomst af revner i "sprødt" materiale

Revnerne kan være meget "fine" og svære at detektere.

**Revnerne kan opstå mange timer efter svejsning (efter inspektion?)
Ventetid for inspektion/NDT er traditionelt 48 timer (DNVGL, AWS, EEMUA)**

Brintrevner i svejste stålkonstruktioner

- Brintrevner eller Koldrevner eller forsinkede revner eller Hydrogen Induced Cracks "HIC" eller Delayed Cracks

Opstår i ferritiske stål (primært C- Mn stål) e.g. S355-, S420-, S460-

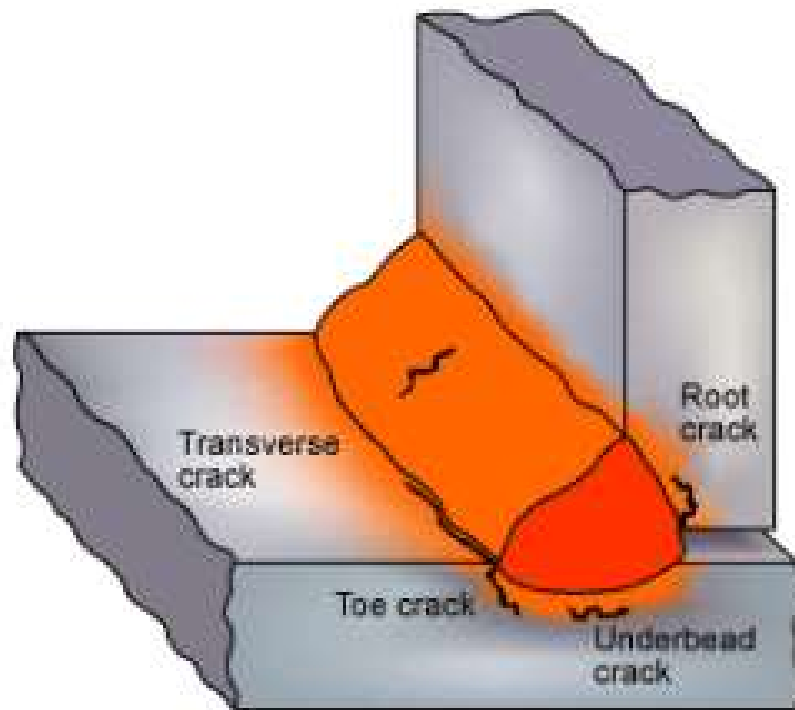
Opstår i grundmateriale ved svejsninger og i selve svejsningerne

Opstår ved lav temperatur (lavere end 200 °C) og kan dannes fra lige efter svejsning og op til 48 – 72 timer efter svejsning

Forøget risiko ved montage- og site svejsereparationer

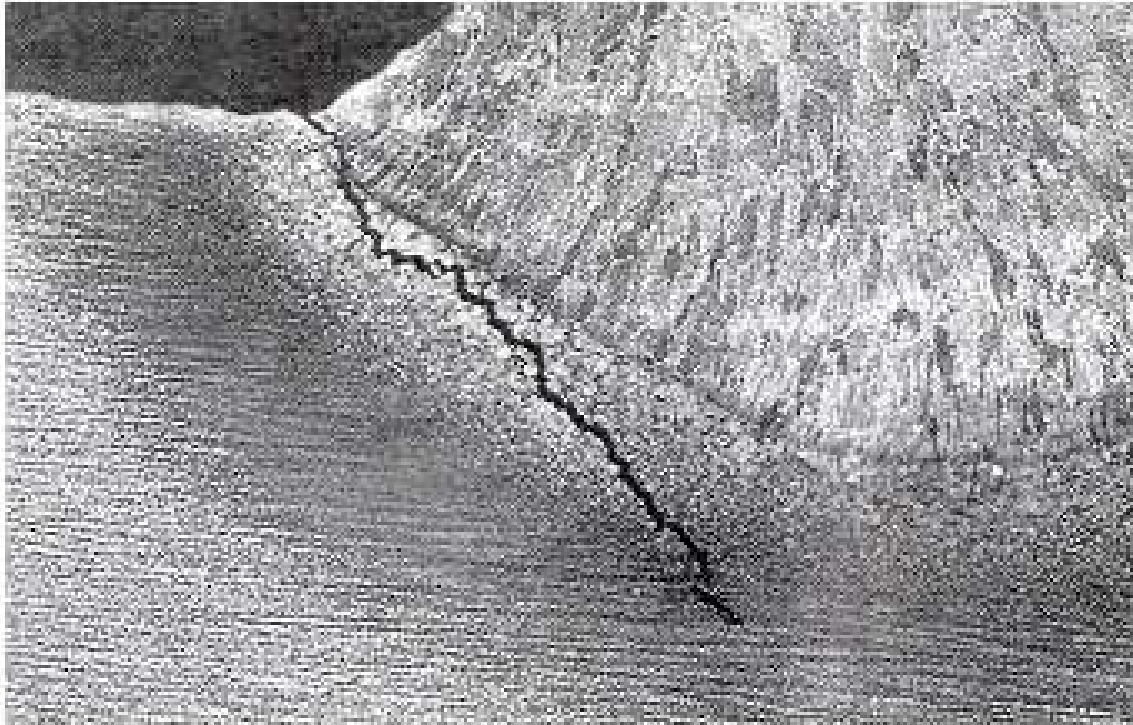
Brintrevner Hvor findes de?

- Positioner og orientering af Brintrevner



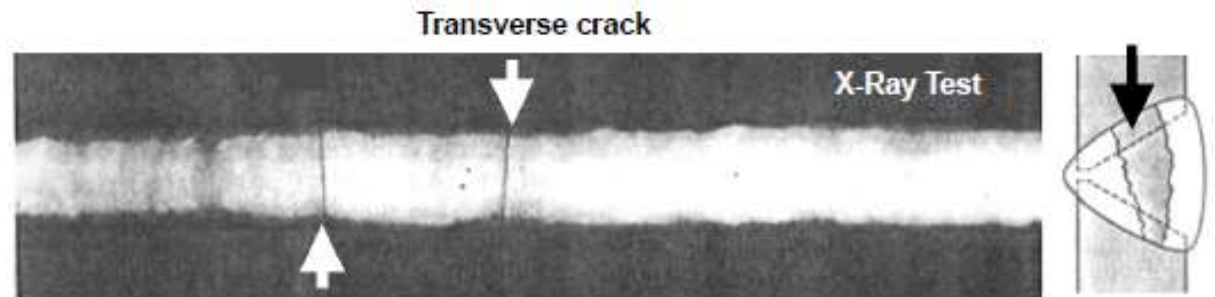
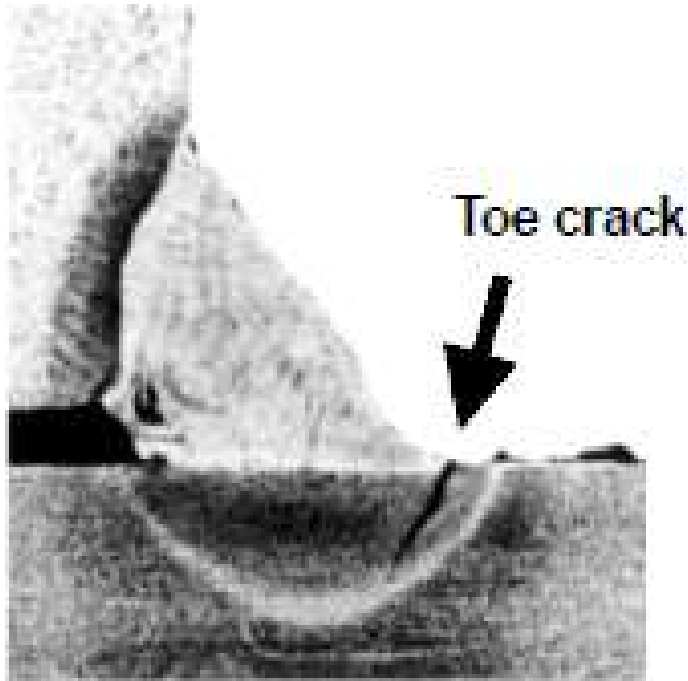
Brintrevne Placering og orientering

- Brintrevne (underbead crack) initieret i grovkornet zone lige uden for svejsning



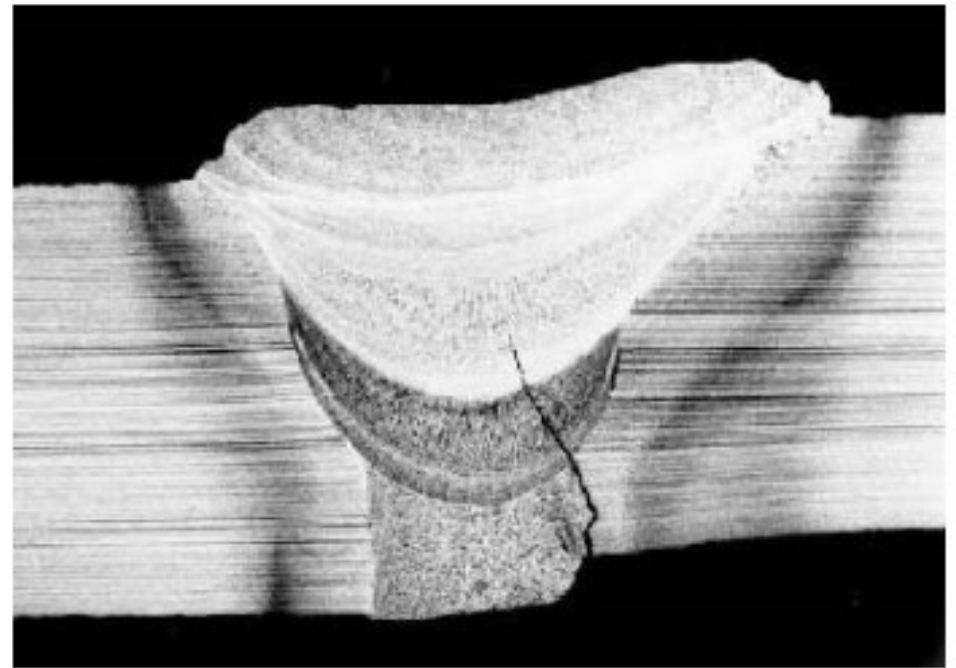
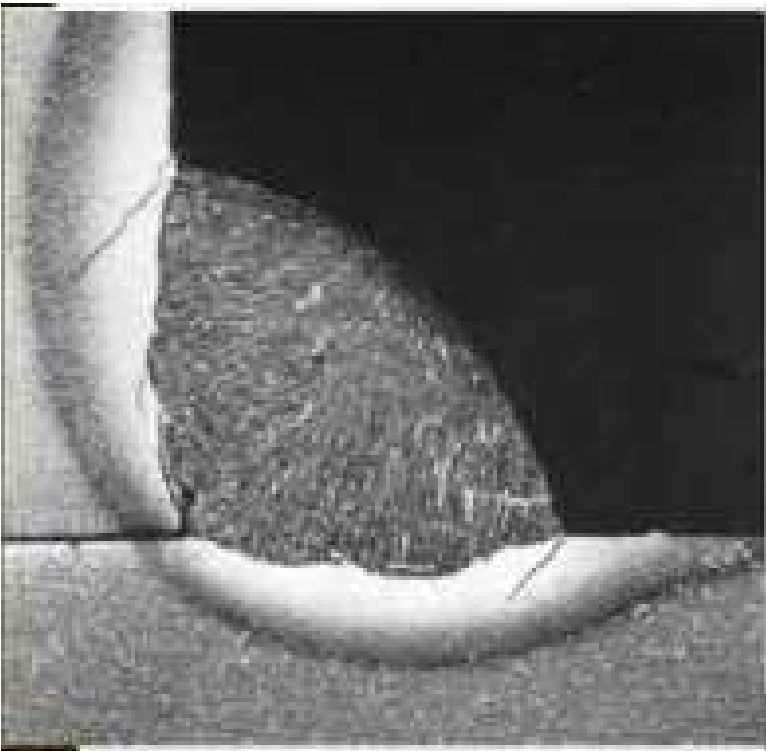
Brintrevne Placering og orientering

Tværgående revne i stumpsøm og toe crack /under bead crack under kantsøm



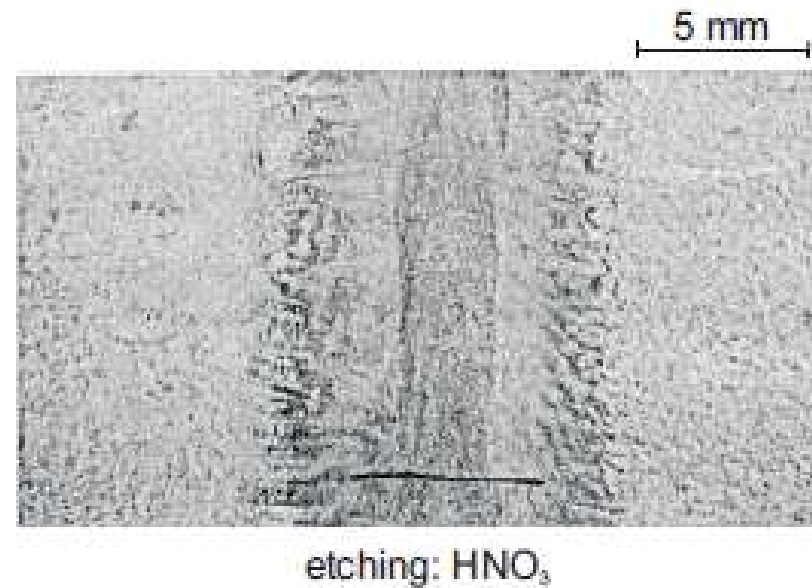
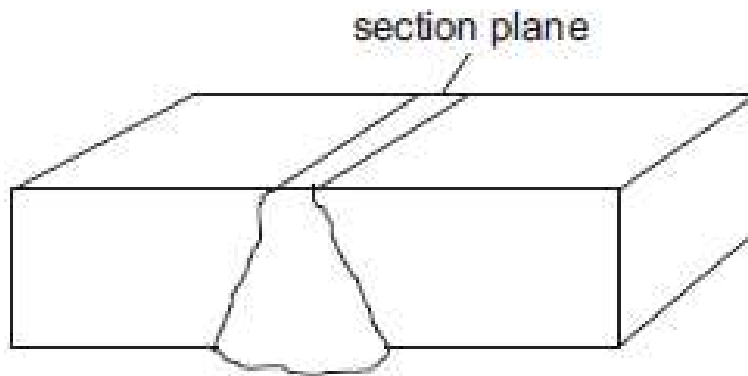
Brintrevne Placering og orientering

- Eksempler på Toe cracks ved kantsøm og root crack ved rørsvejsning (stumpsøm)



Brintrevne Placering og orientering

- Tværgående revne i svejsemetal



Brintrevne Placering og orientering

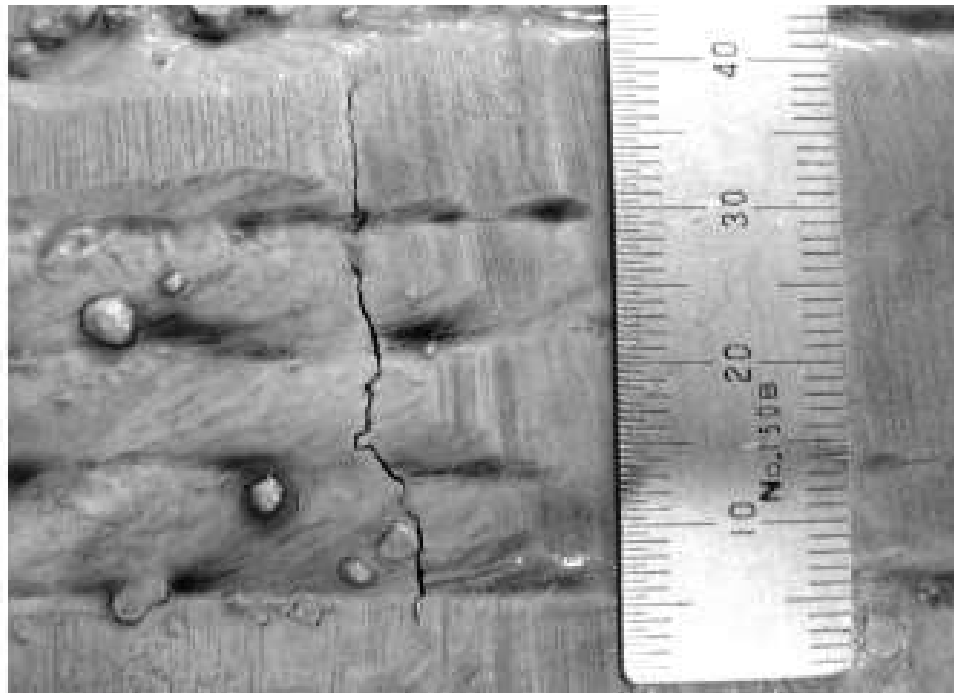
- "skrå brintrevner" Chevron cracks i svejsninger i mellem- og højstyrkestål



Longitudinal weld metal section showing 45° transverse or 'chevron' cracking

Brintrevne Placering og orientering

- Tværgående revne i svejsning med højstyrkestål og højstyrke tilsatsmateriale

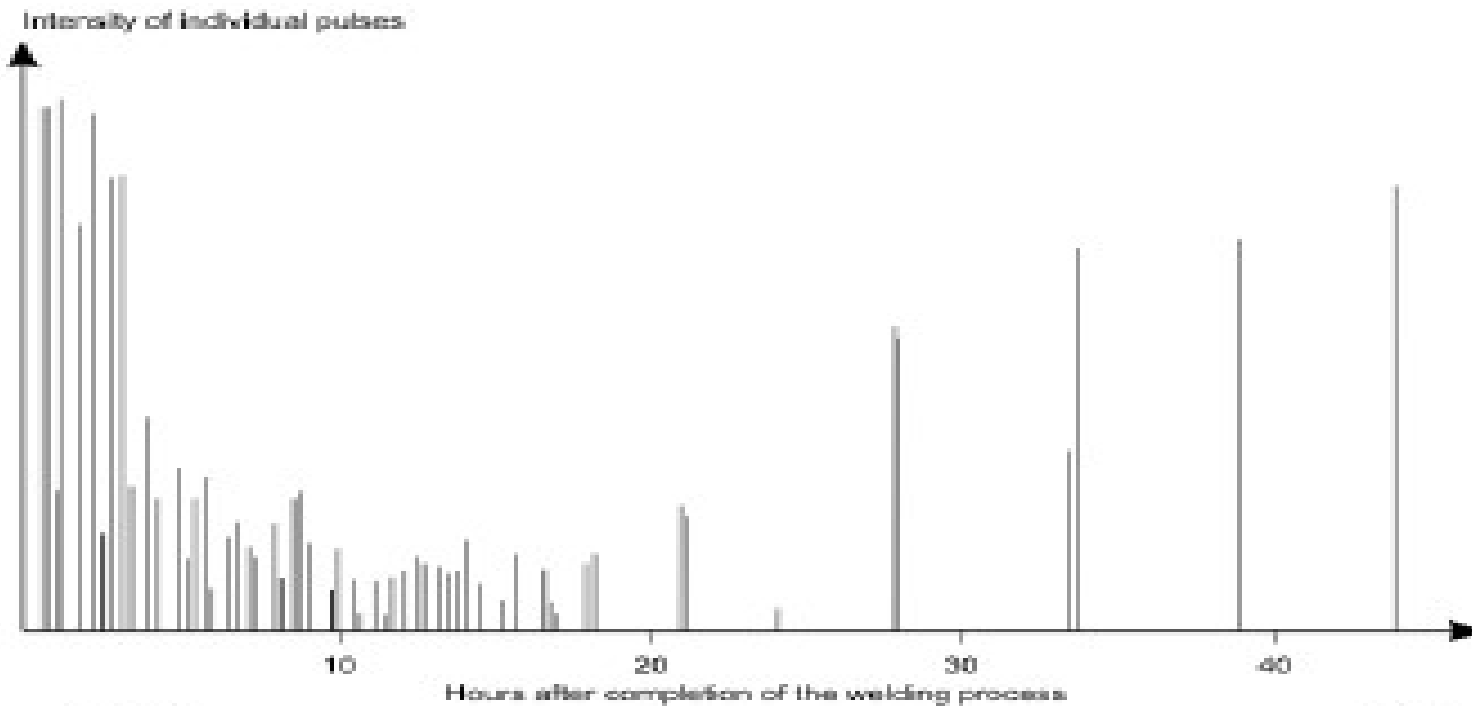


Photographs showing typical transverse cracking in high strength multipass flux cored weld deposits.

Brintrevner udvikling over tid (40 timer efter svejsning)

Overvåget med akustisk emission

S420 materiale med stumpsøm Laboratorieforsøg



01-01-00-00

10-01-00-00

Research
ISF

Schematic Representation
of Sound Emissions



Brintrevner EN 1090-2 standardens krav om NDT ventetid

- EN 1090 har standard tabel for minimum tidsrum mellem svejsning og NDT

Tabel 23 - Minimumholdetider

		Holdetid (timer) ^a	
Hvis der anvendes forvarmning i henhold til metode A i EN 1011-2:2001, anneks C			
Svejsningens størrelse (mm) ^b	Varmetilførsel Q (kJ/mm)	S275 - S460	Over S460
a eller s ≤ 6	Alle	Kun afkølingstid	24
6 < a eller s ≤ 12	≤ 3	8	24
	> 3	16	40
a eller s > 12	≤ 3	16	40
	> 3	24	48

Brintrevner EN 1090-2 standardens krav om NDT ventetid

Højstyrke stål og mere legerede stål
Ventetider mere kritiske ved højstyrkestål

Tabel 23 - Minimumholdetider

	Holdetid (timer) ^a	
Hvis der anvendes forvarmning i henhold til metode B i EN 1011-2:2001, anneks C		
Svejsningens størrelse (mm) ^b	S275 - S690	Over S690
a eller s ≤ 20	Kun afkølingstid	24
a eller s > 20	24	48

Brintrevner 3 Samtidige forudsætninger

- **1: Der skal være brint til stede under svejsningen**

Mulige kilder:

Fugt i/på elektroder, svejsetråd eller i pulverflux

Fugt fra utilstrækkelig gas dækning eller uren svejsegas

Kulbrinter fra fedt, skæreolier, rengøringsmidler på fugeflader ved svejsninger

Snavs, rust på fugeflader eller svejsetråd

- **2: Det varmepåvirkede område skal have en "sprød" hård struktur**

Her en metallurgisk kornstruktur med hårdhed min. 350 HV₁₀

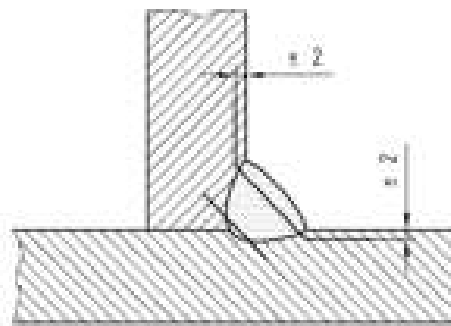
3: Svejsningen udsættes for Trækspændinger

(svejsespændinger efter afkøling af svejsning)

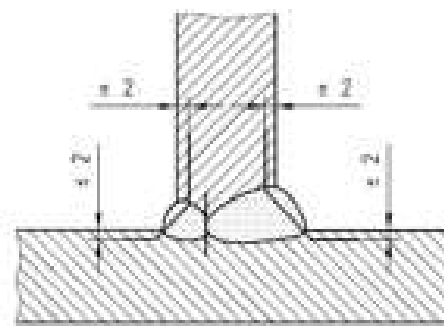


Hvor måles hårdheder i svejsesamlinger?

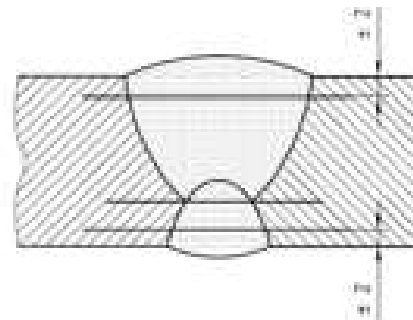
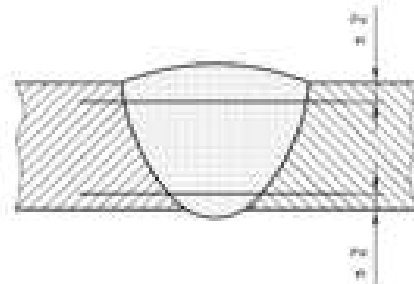
Positioner for hårdhedsmålinger på test emner HV10



e) Fillet weld



f) T-butt weld



Brintrevner Forholdsregler før/under/efter svejsearbejde

- **Før: Forhindre/mindske forekomst af brint:**
Check at fugeflader er rene og tørre
Check at svejse tråd /elektroder er ”tørre” og rene inkl. pulverflux
Check at svejse beskyttelsesgas dækning virker
- **Under: Sikre at undgå for hurtig afkøling og dermed høje hårdheder:**
- **Overhold forvarme temperatur før/under svejsning**
- **Overhold svejseprocedures heat input (Volt og Ampere og svejsehastighed)**
- **Brug evt. eftervarme (ca 250 °C)**

Efter: Sikre ventetid fra svejsnings slut til inspektion og NDT:
Udfyld svejse log så svejsearbejdes sluttid er tydelig for NDT inspektøren
Check at inspektør er bekendt med krævet ventetid.

Forholdsregler under design og planlægning

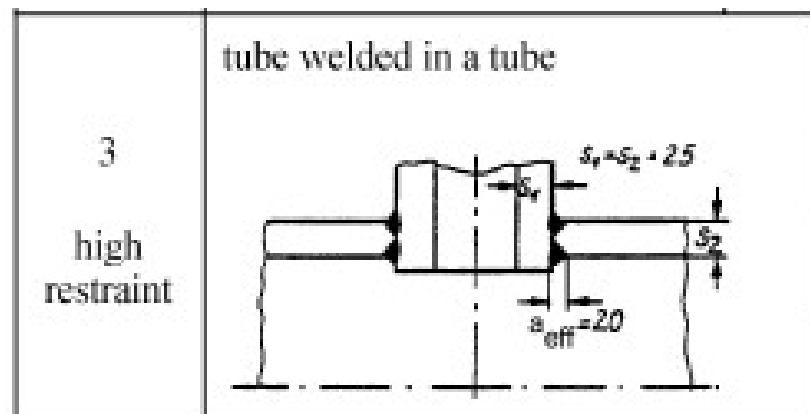
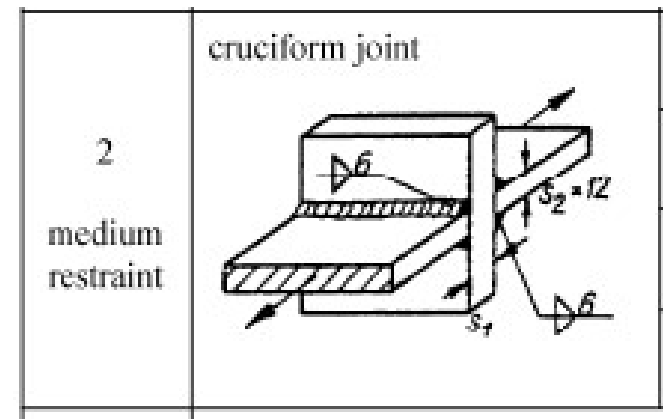
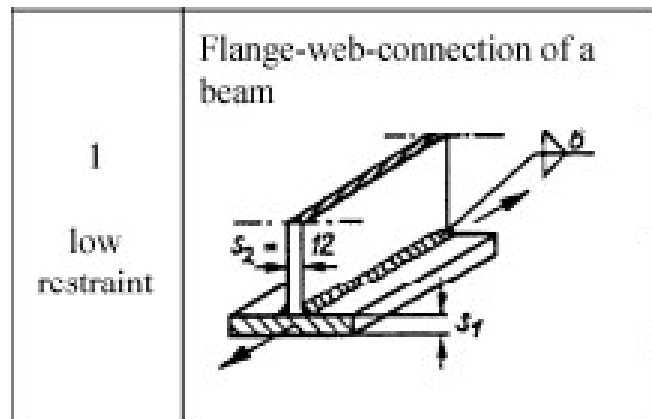
- **Konstruktørens og svejsekoordinatorens overvejelser og specifikationer:**
- **Materialevalg:** God svejselighed – lav hærdbarhed og begræns brint indhold
Valg af stål med ”lav” Kulstofækvivalent (Ceq) (lav hærdelighed /hårdhed)
Valg af svejsetilsats (tråd/elektroder) med standardiseret lavt brintindhold Evt. Nikkelholdig svejsetilsats
- **Konstruktionsudformning:** Reducer svejseuspændinger og ”slip af med brinten”
Søg at begrænse materiale/søm tykkelser (jo tykkere jo længere diffusionsvej til det fri for brint i/ved svejsning og samtidig højere afkølingsrate -desto større hærdning/ revnerisiko)
Søg at designe svejseamlinger med begrænset indspænding (og tykkelse) for at begrænse niveau og område med svejseuspændinger.

Svejse/samlingsplaner: Reducer svejseuspændinger

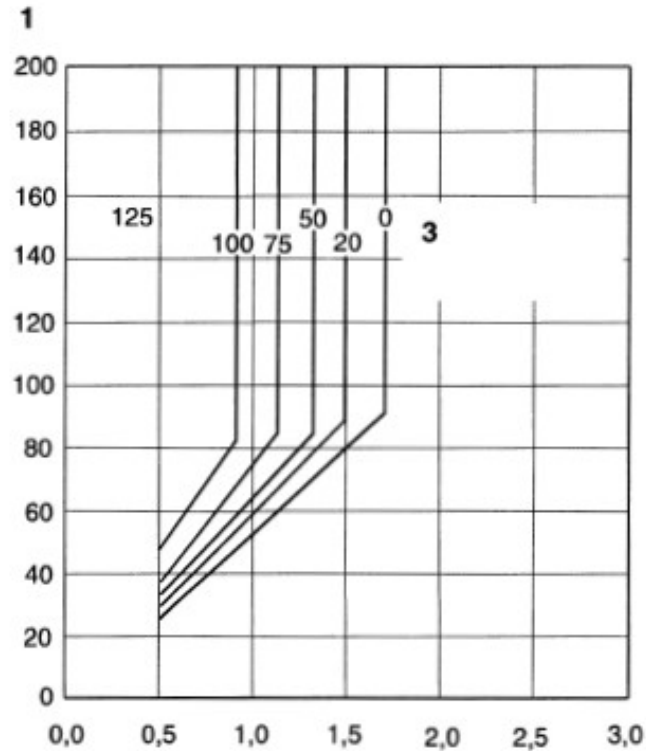
Prøv at indtænke svejseamlingers placering og samplingsrækkefølge i konstruktionen for at begrænse niveau og område med svejseuspændinger. Samplingsrækkefølge kan være medvirkende til at begrænse indflydelse af svejseuspændinger.

Indspændingsgrad som tolket i Eurocode 1993-1-10

- Eksempler Lav, medium og høj indspændingsgrad



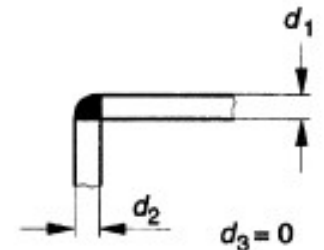
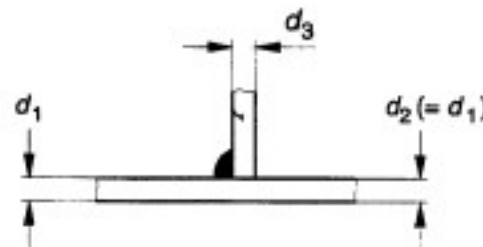
Bestemmelse af forvarmetemperatur som eliminerer risiko for brintrevner - efter EN 1011-2



4	A	B	C	D	E
5	0,38	0,41	0,43	0,48	0,50

- 1 Kombineret tykkelse, mm
- 2 Varmetilførsel, kJ/mm
- 3 Minimum-forvarmetemperatur, °C
- 4 Klasse
- 5 Til brug ved carbonækvivalent, der ikke overstiger

$$\text{kombineret tykkelse} = d_1 + d_2 + d_3$$



Heat input (Varmetilførsel ved svejsning)

$$Q = k \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \text{ in kJ/mm}$$

- Q: Heat input ved svejsning kJ/mm svejsesøm længde
- U: Svejsespænding Volt
- I: Svejsestrøm Ampere
- V: Svejsehastighed mm/s
- K: Termisk virkningsgrad (0,6 - 1.0) afhængig af svejseproces

Carbon Equivalent (CE) (Kulstofækvivalent) og Brintindhold i svejsetilsatsmateriale

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

Tabel C.2 – Hydrogenklasser

Diffusibelt hydrogen ml/100 g nedsmeltet svejsemetal	Hydrogenklasse
> 15	A
10 ≤ 15	B
5 ≤ 10	C
3 ≤ 5	D
≤ 3	E

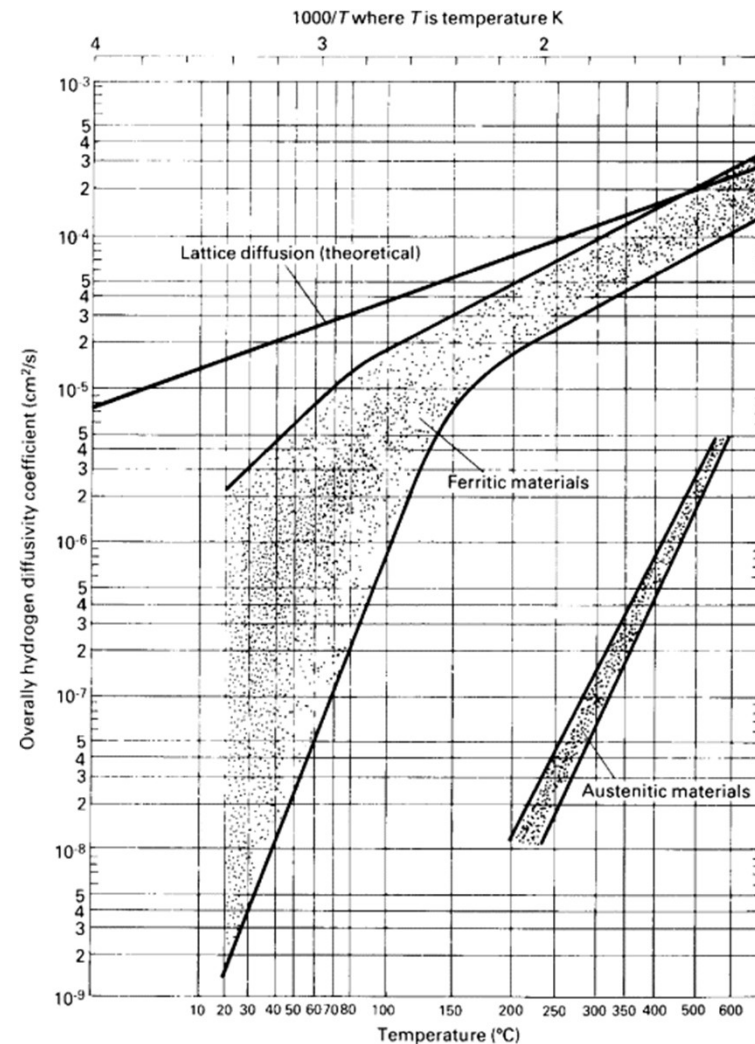
Brints diffusionshastighed ved høj og lav temperatur

- Eftervarme : f.eks. 200 °C

Ved 200 °C er Brints diffusionskoefficient i stål flere hundrede gange højere end ved 20 °C

NDT ventetid normalt ikke påkrævet ved eftervarme på 250 °C i få timer (ca 2-3)

NDT ventetid normalt ikke påkrævet efter Spændingsfriglødning (PWHT) som foregår ved 580 – 650 °C (typisk 1-2 timer)



Brintrevner Afslutning

- Brint revner/kold revner/forsinkede revner er ikke et hyppigt problem i dag.
- Revnerne ses stort set ikke for stål med flydespænding under 355 MPa
- Problemet kan blive mere aktuelt fremover med øget anvendelse af stærkere stål og større tykkelser af svejsesamlinger
- Problemet kan imødegås med enkle forholdsregler i værksted og med kvalificeret svejsetilsyn.
"Fjerne værksteder" med begrænset kontakt til konstruktør rummer risici
Montagesvejsning- og site reparationer rummer risici.

Brintrevner Reference standards

- **EN 1011-1 Svejsning – retningslinier for svejsning af metalliske materialer**
Del 1 Generel vejledning for lysbuesvejsning
- **EN 1011-2 Svejsning – retningslinier for svejsning af metalliske materialer**
Del 2 Lysbuesvejsning af ferritiske stål
- **CEN/TR ISO/TR 17844 Welding**
Comparaison of standardized methods for the avoidance of cold cracks
- **EN 1090-2 Udførelse af stål-og aluminiumkonstruktioner**
Del 2 Tekniske krav til stålkonstruktioner

AWS D1. Structural Welding Code (American Welding Society)