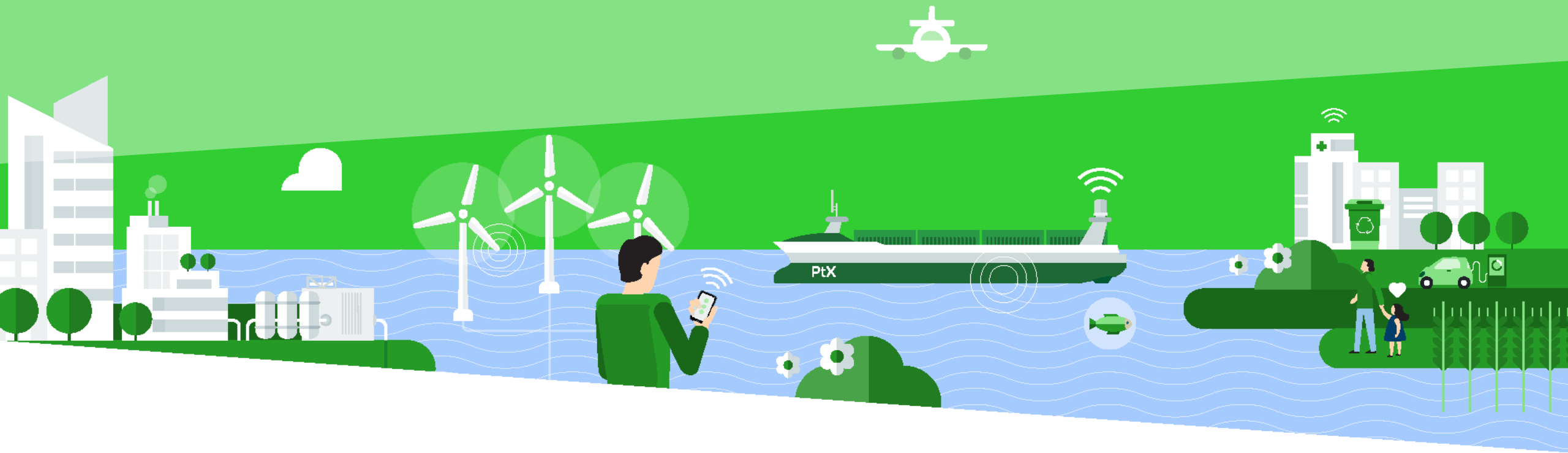




Hydrogensprekker – Årsaker og mekanismer

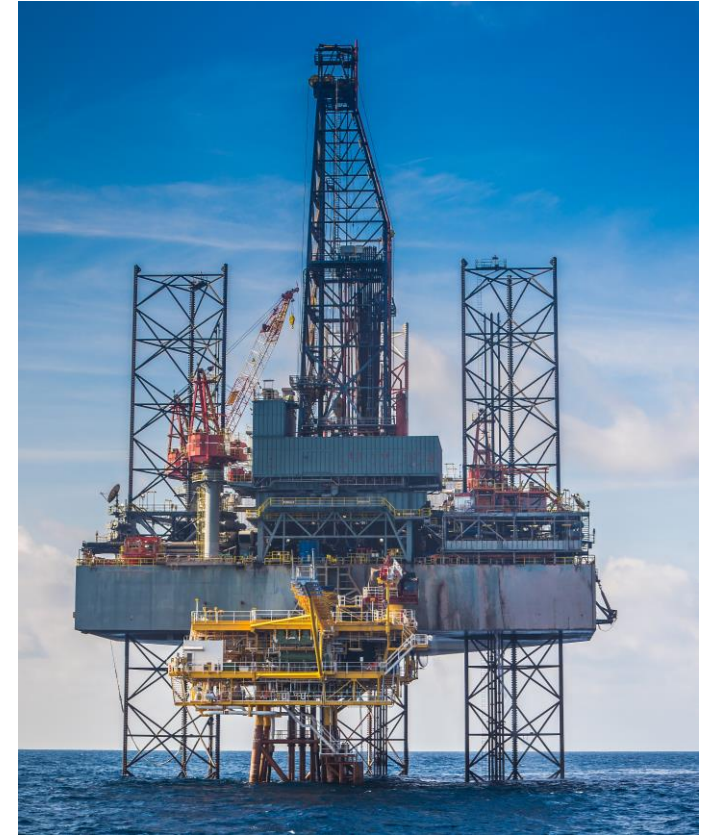
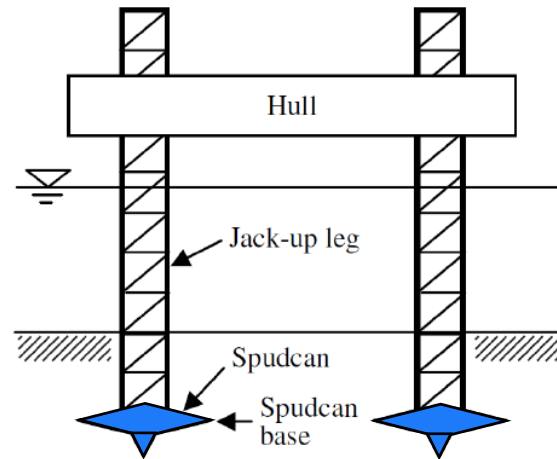
Marianne Videm, FORCE Technology

mav@forcetechnology.com

4. September 2024

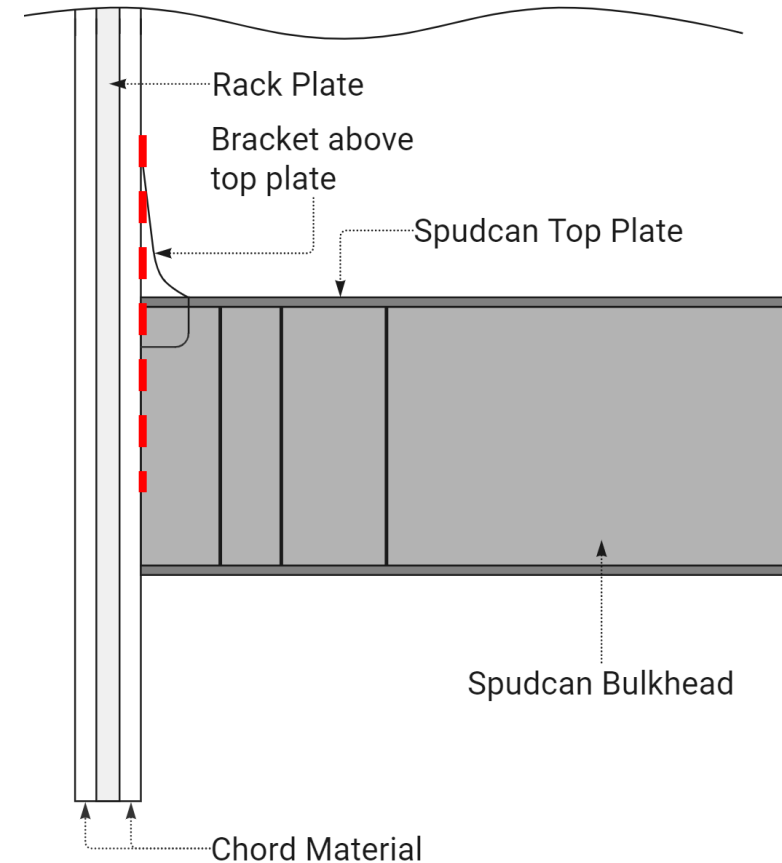
Bakgrunn

- Hydrogenassistert oppsprekking av oppjekkbare innretninger
 - Sprekker i overgangen mellom ben og føtter
- Høyfaste stål
 - 690 MPa SMYS
- Høye spenninger
 - Normal utnyttelse
- Katodisk beskyttelse
- Studie utført for Havtil (tidligere Ptil)
 - Litteraturstudie
 - Erfaringer med sveising, NDT og skadeanalyser



Sprekker ved innsveiste føtter (spudcans)

- Sprekker
 - Spudcan – chord
 - Spudcan – bracket
- 80-tallet
 - Sveismetall
- 2022
 - HAZ



Construction details at the spudcan to leg transition

Målsetning

- Mekanismene for hydrogensprekker
 - Mekanismer som er relevant for oppjekkbare installasjoner
 - Omfang og årsaker
- Forhold som bidrar til hydrogensprekker
 - Initiering og vekst
 - Hydrogen, spenninger og materialegenskaper
- Tiltak for å forhindre hydrogensprekker
 - Materialbegrensninger
 - Kilder til hydrogen
 - Andre tiltak, f.eks. maling

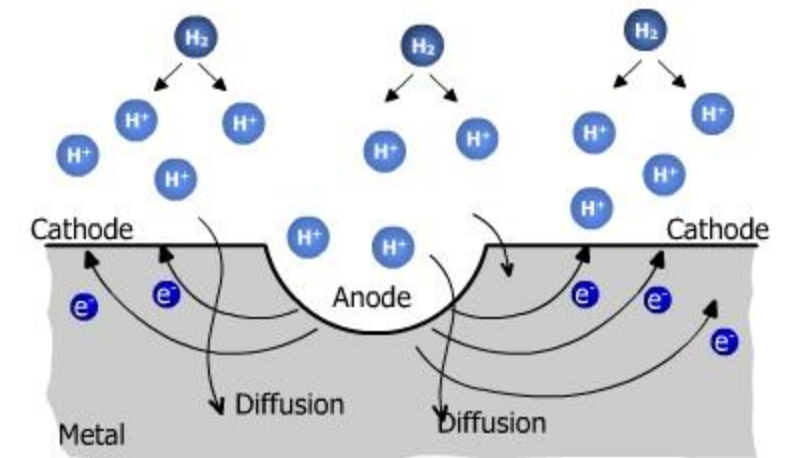
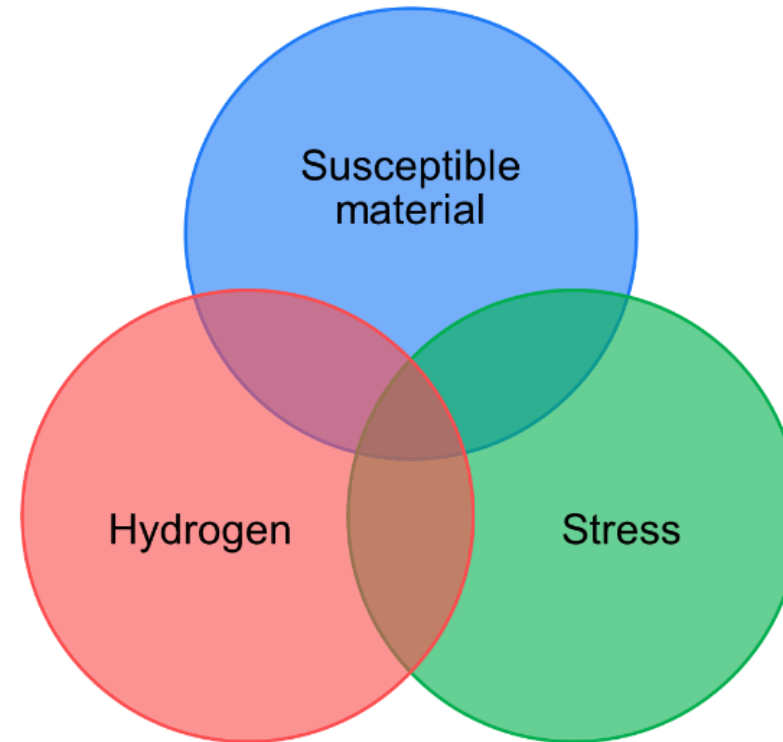


Illustration of Hydrogen diffusion.

Hydrogenforsprøying

- Hydrogen embrittlement (HE)
- Følsomt materiale
 - Mikrostruktur
- Tilstrekkelig mengde hydrogen
- Tilstrekkelig høyt spenningsnivå
 - Restspenninger
 - Funksjonslast
 - Naturlast

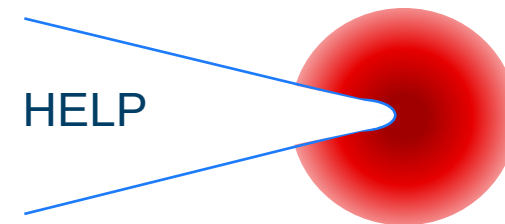
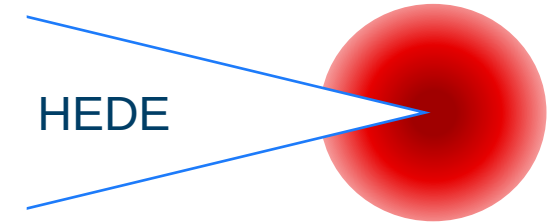


Spenninger

- Atomært hydrogen vil diffundere til områder med høye strekkspenninger
 - Termodynamikk
- Mikrostrukturelle inhomogeniteter
 - Mer plass for hydrogen
 - Partikler/inneslutninger, korngrenser og dislokasjoner
 - Spenningsfelt (trykk, strekk, skjær)
- Begrense utnyttelsen av materialet

Hydrogenforsprøingsmekanismer

- HEDE (Hydrogen-enhanced de-cohesion)
 - Bindingene mellom Fe-atomene svekkes i nærvær av H
 - Lokalt sprøtt brudd
 - Høy løselighet av H ved spenningskonsentrasjoner
 - Sprekkspissen, partikler, kantdislokasjoner
- HELP (Hydrogen-enhanced localized plasticity)
 - H øker dannelse og bevegelse av dislokasjoner ved sprekkspissen
 - Lokalt duktilt brudd ved sprekkspissen
 - Makroskopisk sprøtt brudd
- Ole Brumm
 - H begrenser dislokasjonsbevegelsen



Material følsomhet

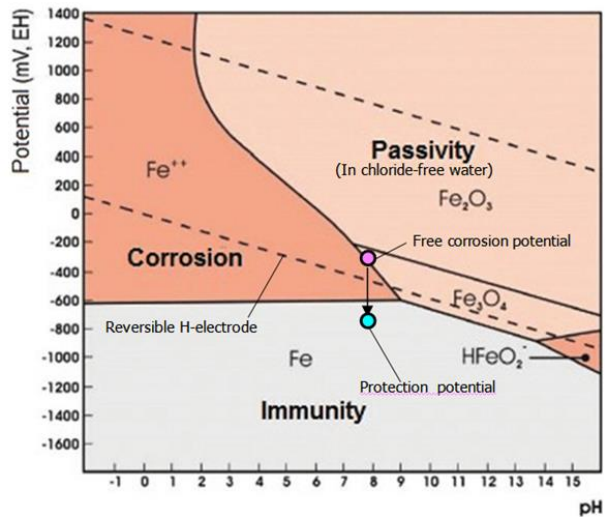
- Høyfaste stål er mest utsatt
- Hydrogen i stålet har liten innvirkning på
 - Flytespenning
 - Strekkfasthet
- Hydrogen kan ha sterk innflytelse på
 - Bruddseighet
 - Bruddforlengelse
 - Tverrsnitts reduksjon ved brudd
 - Utmatting
 - Kritisk spenning
 - Sprekkveksthastighet

Konstruksjonsstål

High strength steels used offshore			
Strength (SMYS) MPa	Steel grade	Process Route	Application Area
350	X52	Normalised TMCP	Structures Structure & Pipelines
450	X65	Q & T TMCP	Structures Pipelines
550	X80	Q & T TMCP	Structures & Moorings Pipelines
650		Q & T	Jack-ups and Moorings
690	X100	Q & T	Jack-ups and Moorings
750		Q & T	Jack-ups and Moorings
850		Q & T	Jack-ups and Moorings

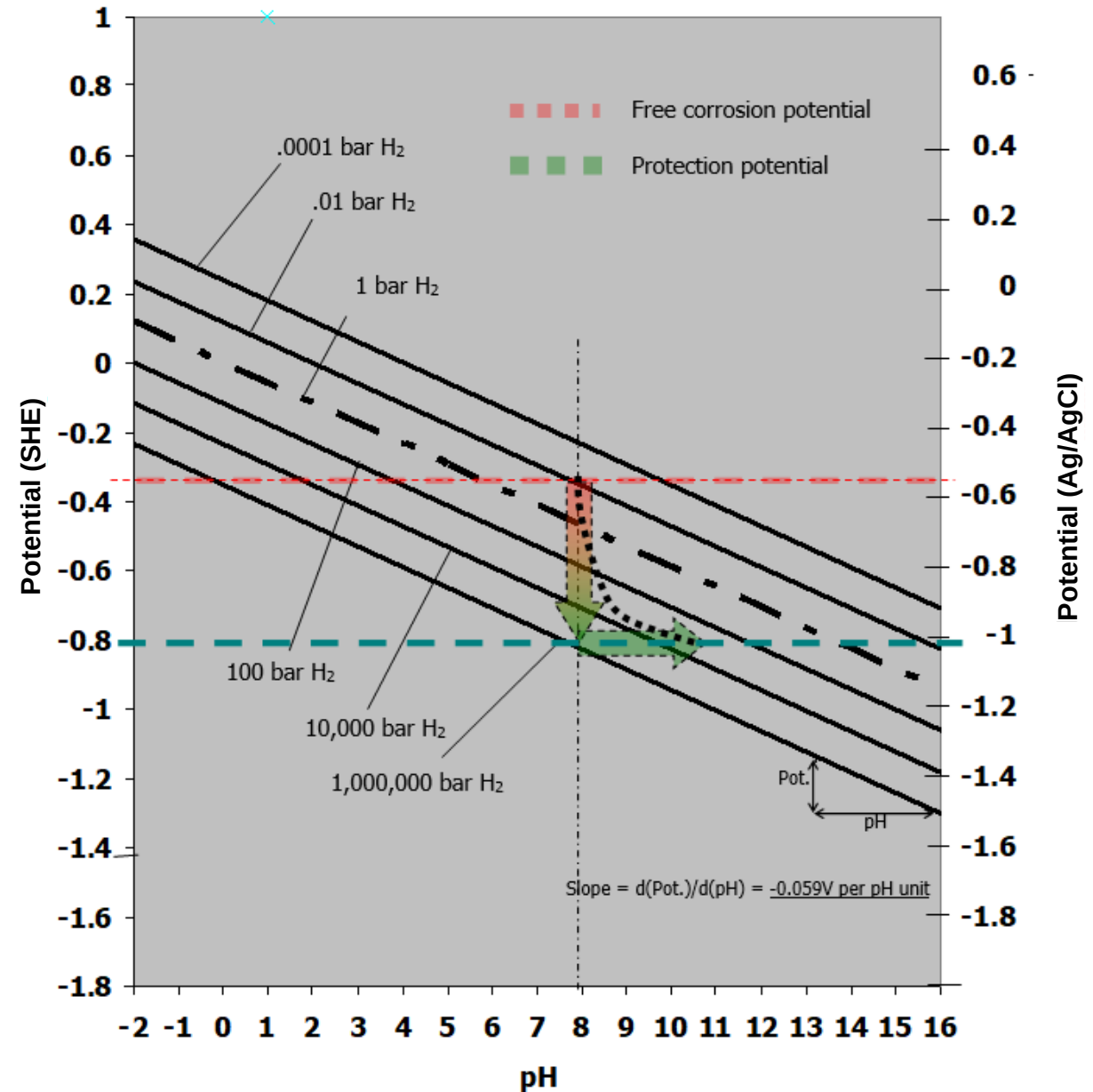
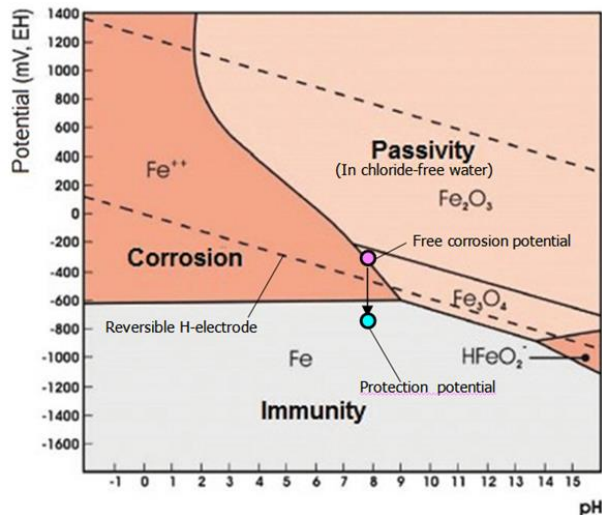
Hydrogenkilder

- Under fabrikasjon
 - Sveising
- Under drift
 - Katodisk beskyttelse
 - Korrosjon



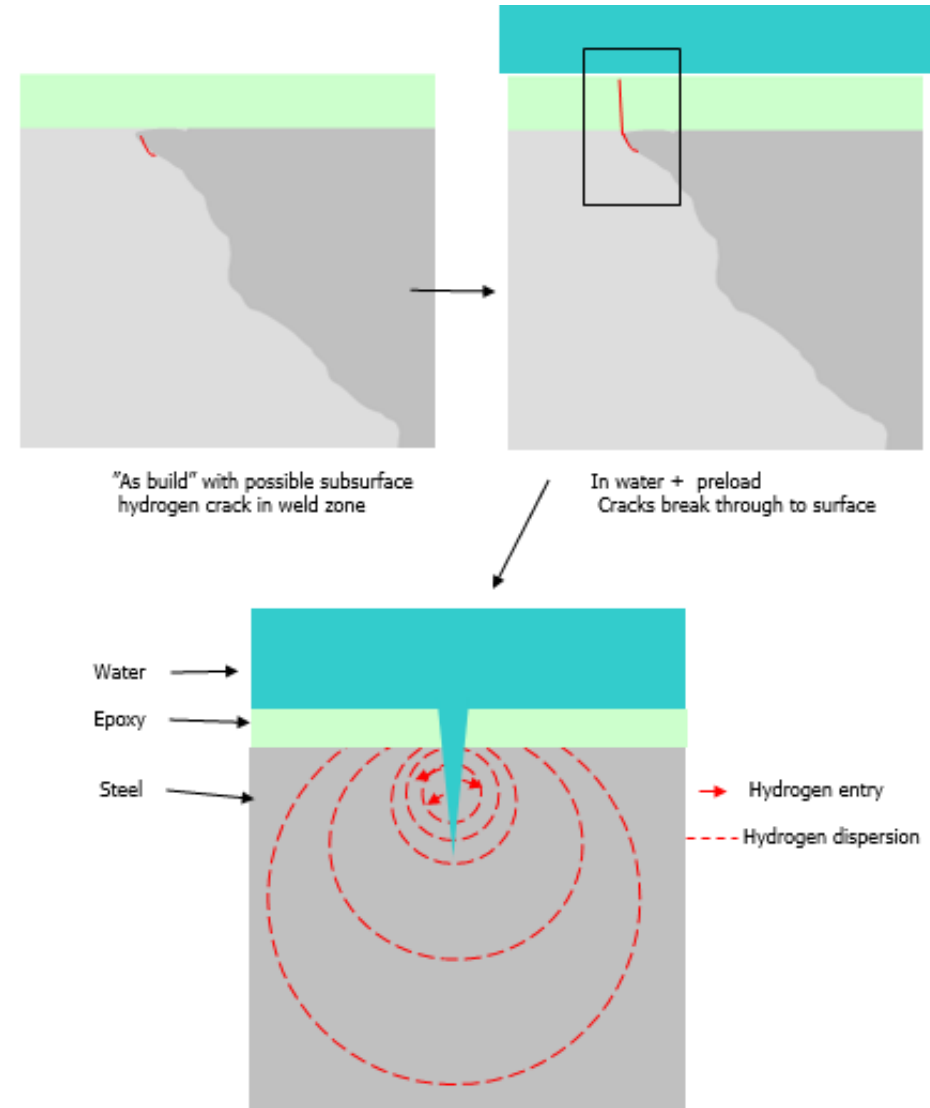
Hydrogenkilder

- Under fabrikasjon
 - Sveising
- Under drift
 - Katodisk beskyttelse
 - Korrosjon



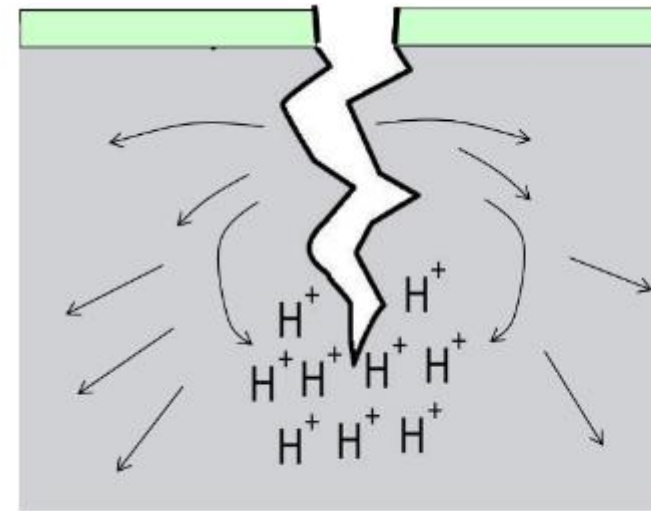
Mulig årsak til sprekker på jack-ups

- Små sprekker fra fabrikasjon
 - Typisk kaldsprekker fra sveising
 - I sveismetallet og i HAZ
 - Malt struktur
- Ved belastning åpnes sprekken
 - Bort metall eksponeres
- Hydrogenladning av stålet begynner
 - CP
 - Lite eksponert areal
 - Lavt potensial

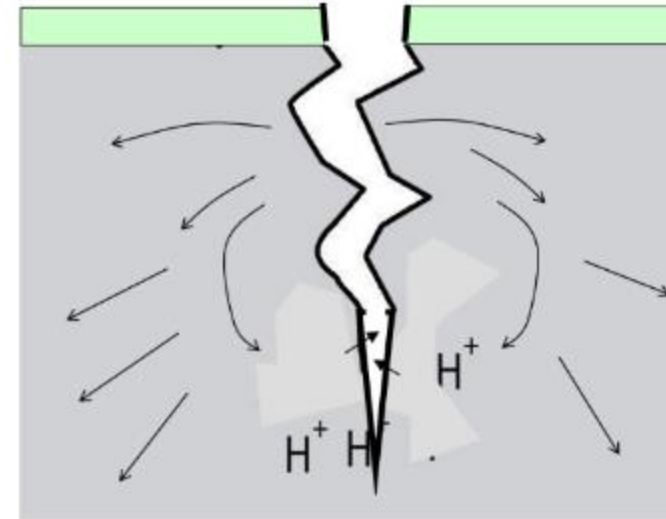


Årsak til sprekkenene

- Hydrogenladning av stålet
 - Kun i sprekkenene
 - Lokal HE
- Sprekkvekst
 - Spenningskonsentrasjon ved sprekspissen
 - Langsom sprekkvekst
 - Trinnvis vekst
 - Fornyhet H-tilførsel
 - CP
- Hvordan hindre dette?

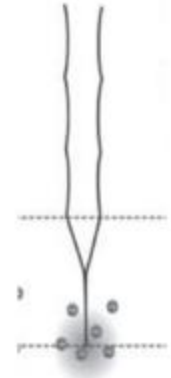


Hydrogen collects around crack tip and crack propagates when hydrogen concentration, stresses and material susceptibility dictates



Hydrogen escapes through new crack surface, but starts to rebuild high concentration again to repeat the cracking process

Result: Slowly (stepwise interrupted) progressing hydrogen stress cracking



Hydrogensprekker fra fabrikasjon

- Hydrogensprekker etter sveising
 - Kaldsprekk, herdesprekk
 - Hydrogensprøhet pga. hydrogen i sveisens smeltebad
 - HMS
 - Hydrogen
 - Martensittransformasjon under avkjøling
 - Strekkspenninger i sveisen
 - Hardhet i HAZ
 - Høy C_{ekv}
 - Rask avkjøling etter sveising



- Høyfast stål
 - QT-stål
 - QT-stål med lavt C-innhold har god sveisbarhet

Hydrogensprekker fra fabrikasjon

- Hydrogen accelerated cold cracking (HACC)
 - Stålsammensetning
 - Grunnmaterialet og sveisetilsett
 - Fuktighet er opphav til hydrogen
 - Rengjøring av fugen
 - Tørkingen av elektrodene
 - Sveiseparametere
 - Forvarming
 - Varmetilførsel
 - WPS



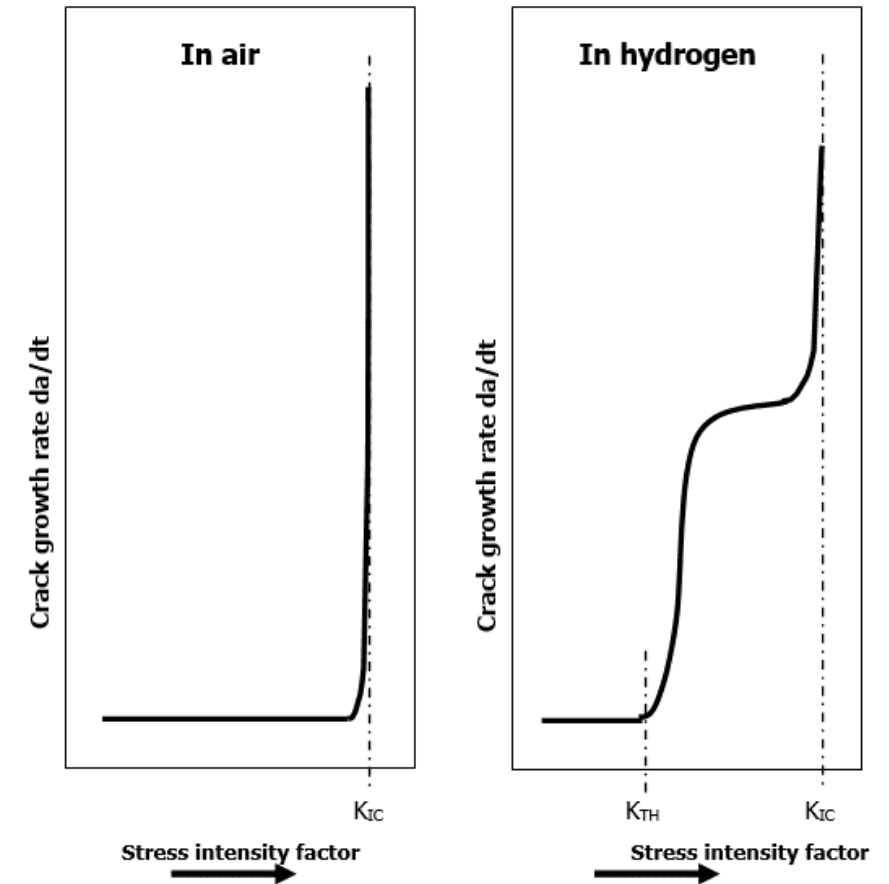
Chord to rack weld
Several years in operation
Grinded + MPT

Tiltak for å unngå kaldsprekker

- Bruddseighet i HAZ og sveismetall
- Stålkjemi
 - Lavt C-innhold og lav CE, lavt innhold av forurensingselementer, spesielt fosfor
- Sveising
 - Riktig tilsett, tørre elektroder (basiske), rene sveiseflate og god dekgass
 - Avkjøingshastighet
 - Lav varmetilførsel
 - Forvarming
 - Sveisens geometri, sveiserekkefølge for å gi mindre spenninger
 - PWHT/anløping
 - Hydrogen diffunderer ut av sveisen til HAZ og grunnmaterialet
 - Tap av hydrogen mot fri overflate

Hydrogensprekker i drift

- Hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISC)
 - Hydrogensprøhet pga. en ytre hydrogenkilde
 - Ofte hydrogen frigjort ved CP
 - Hydrogenutvikling på metalliske rene ståloverflater
 - Lokal HE ved sprekspissen
 - Hydrogentilførsel mens sprekken vokser
 - Spenning over flytegrensen
 - Lokal spenningskonsentrasjon
 - Kaldsprekker eller sveisedefekter

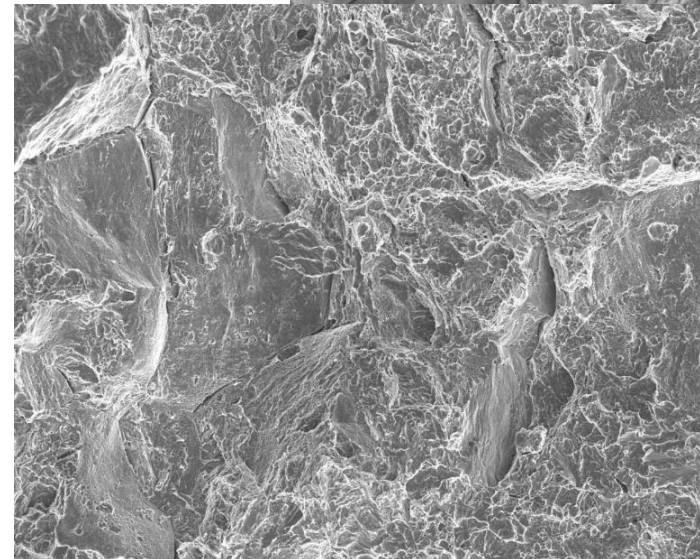
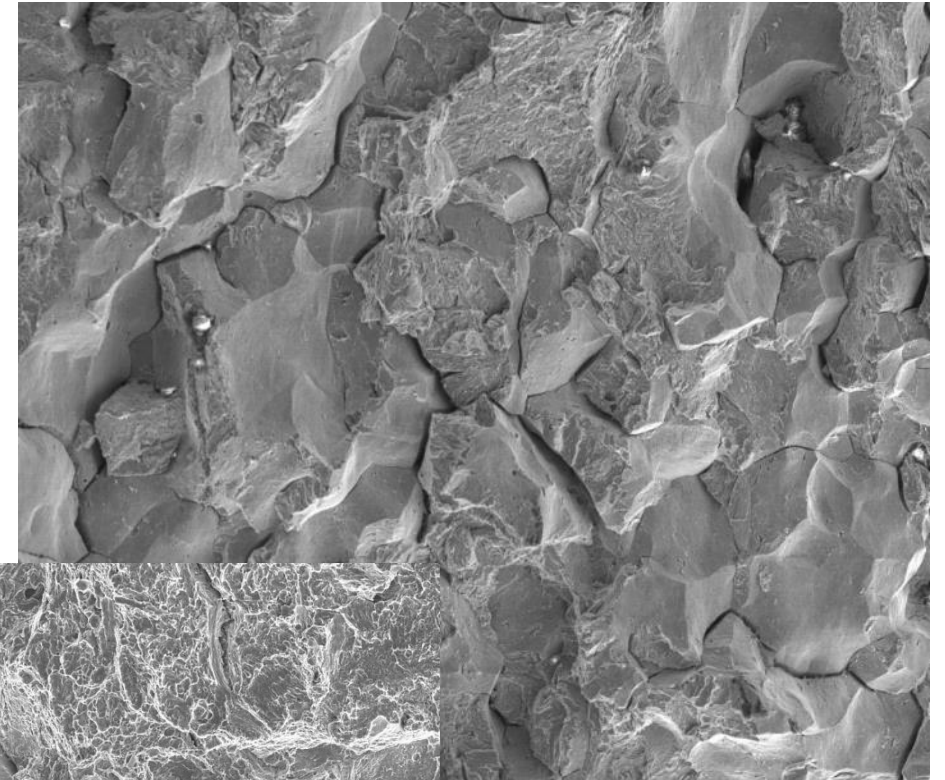


Materialenes tilbøyelighet til HE

- Hydrogenforsprøing
 - Kaldsprekker og HISC
- Hydrogen kan redusere metalllets evne til å absorbere energi
 - Til å deformeres før brudd, dvs. redusert bruddseighet
 - Også $\sigma < \sigma_f$ (men $> \sigma_p$) kan forårsake sprekkitiering og -vekst
- Vurdering av følsomhet for hydrogensprekker
 - Faktiske verdiene for flytegrense og hardhet må vurderes
 - Ikke bare det som er typisk for materialet
 - Tverrsnittsreduksjon ved brudd (Z eller RA)
 - $Z_H/Z_{\text{luft}} \geq 0,9$

Ikke-destruktiv testing – NDT

- Fabrikasjonsfasen
 - Avvik fra WPS
 - NDT er avgjørende for å oppdage kaldsprekker
- Inspeksjon i driftsfasen
 - UWILD - Undervannsinspeksjon i stedet for tørrdokking
 - Har erfart sprekker ikke ble oppdaget
 - Inspisert med UWIL NDT og godkjent
- Inspeksjonsmetode og omfang
 - Må velges for å unngå lignende hendelser !
- Fitness for service



690 MPa stål

Konklusjon

- Hovedårsak til sprekken
 - Antagelig uoppdagede fabrikkasjonsfeil
 - H fra CP har bidratt til sprekkvekst
- Belegg og CP design kan begrense hydrogenladning
 - H-dannelse og diffusjonen H inn i stålet
- Langsom sprekkvekst, ikke fare for kollaps
 - Mikroduktilitet ved sprekkspissen
- 690 MPa stål kan beholde duktiliteten ved hydrogenlading
 - Trygge bruk krever at sveiseprosedyrene følges
 - NDT i fabrikkasjonsfasen er essensielt for å avdekke defekter
 - UWILD under drift vil ikke nødvendigvis oppdage alle indikasjoner



Keep in touch

Marianne Videm
Principal engineer
+47 934 57 400
mav@forcetechnology.com
forcetechnology.com