

# VLIV VODÍKU NA PEVNOST A ŽIVOTNOST ZAŘÍZENÍ

ČÁST 1: ÚVOD

STAVBA PROCESNÍCH ZAŘÍZENÍ (KSZ)

TOMÁŠ LÉTAL, ANEŽKA MICHÁLKOVÁ, 2025



PROJEKT AKCELERACE ZELENÝCH DOVEDNOSTÍ A UDRŽITELNOSTI NA VUT V BRNĚ  
NPO\_VUT\_MSMT-2143/2024-5



# OBSAH

- ÚVOD DO TÉMATU VYUŽITÍ VODÍKU
- VÝROBA VODÍKU
- TRANSPORT VODÍKU A TĚSNOST ZAŘÍZENÍ
- SKLADOVÁNÍ VODÍKU
- VODÍKOVÉ DEGRADAČNÍ MECHANISMY
- PŘÍKLAD HODNOCENÍ PŘÍPUSTNOSTI VODÍKOVÝCH PUCHÝŘŮ PŘI PROVOZU REÁLNÉHO ZAŘÍZENÍ



# CO VÍTE O VODÍKU?

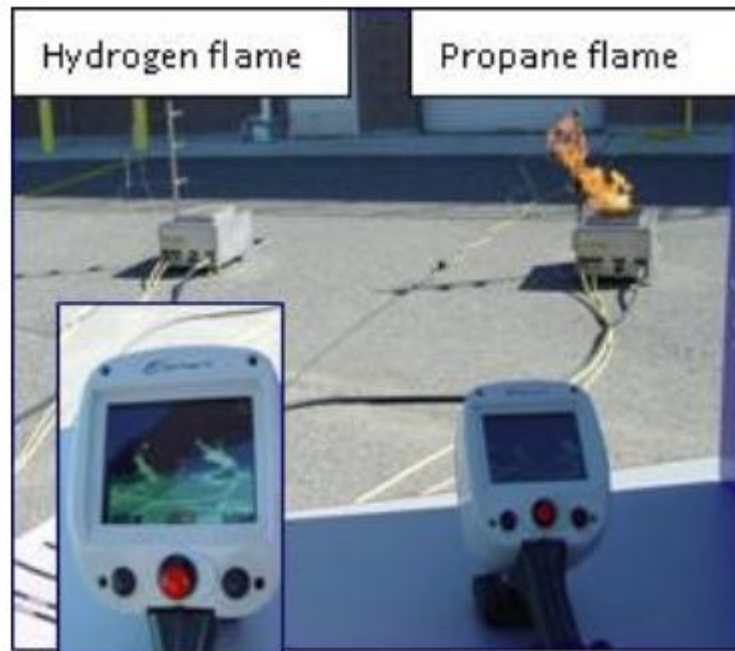


# ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

Porovnání základních vlastností za normálních podmínek

	<b>Zemní plyn (v závislosti na složení)</b>	<b>Metan (hlavní složka zemního plynu)</b>	<b>Vodík</b>
<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>	38 – 50	50	120,1
<b>Výhřevnost [MJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup>]</b>	29 – 38	33,9	10,2
<b>Adiabatická teplota plamene [K]</b>	2 213	2 191	2 318
<b>Rychlost plamene [m/s]</b>	V závislosti na složení	0,45	2,83
<b>Wobbeho index [MJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup>]</b>	41 – 53	50,1	45,8
<b>Rozsah výbušnosti se vzduchem [obj. %]</b>	-	5 – 15	4 – 77

# HOŘENÍ VODÍKU



Hydrogen and Propane Flames in Daylight  
(Photo courtesy of HAMMER)



Hydrogen and Propane Flames at Night  
(Photo courtesy of ImageWorks)

Převzato z [Hydrogen Flames](#) | [H2tools](#) | [Hydrogen Tools](#)

Odkaz na video hoření vodíku [zde](#)

# NEHODA VE FUKUŠIMĚ (2011)

- Zemětřesení následované několika vlnami tsunami
- Voda z tsunami zatopila dieselové generátory a čerpadla chladícího okruhu, čímž se přestal chladit reaktor
- Po odkrytí paliva se rozběhla reakce pára – zirkon, kdy vznikala vodíková směs
- Odvětrávání fungovalo špatně, docházelo k hromadění vodíku v budově reaktoru
- Následně došlo k výbuchu nahromaděného vodíku



Unit 1



Unit 3

Převzato z [Nippon Television News Japan-English](https://www.nippon-tv.com/en/news/2011/03/11/03)



# PROČ SE VĚNOVAT VODÍKU?

- Dekarbonizace energetiky a průmyslu
- Dosažení klimatické neutrality – přechod od fosilních paliv k alternativním zdrojům
- Přehled využití vodíku
  - Přimíchávání vodíku do zemního plynu – spalování jak v kotlích, tak v turbínách
  - Palivové články v dopravě
  - Ukládání energie výrobou vodíku elektrolýzou

- Spalování směsi v paroplynové turbíně ve vídeňské elektrárně Donaustadt
  - Přestavba průmyslově využívané spalovací turbíny
  - Léto 2023: příměs až 15 % obj. ve směsi se zemním plynem
  - Roční úspora CO<sub>2</sub>: cca 33 000 tun při 15 % H<sub>2</sub>, navýšení výkonu o 23 MW
  - Další fáze: cílem je navýšit podíl až na 30 % obj.
- Rozvod směsi (až 20 % obj.) plynárenskou sítí a vytápění domácností
  - HyDeploy ve Velké Británii
  - H2-20 německých společností DVGW a Avacon

# ÚVOD



# VÝROBA VODÍKU

- Přes 95 % veškerého vyrobeného vodíku pochází z fosilních paliv
- Pro dekarbonizaci průmyslu je ovšem klíčové snížení uhlíkových emisí, proto se sleduje, kolik emisí bylo při výrobě vodíku vyprodukováno
- Na tomto základě se rozlišuje několik kategorií – barev – vodíku



<b>Černý</b>	Zplyňování černého uhlí
<b>Hnědý</b>	Zplyňování hnědého uhlí
<b>Šedý</b>	Výroba z fosilních paliv, kdy je CO <sub>2</sub> vypouštěn do atmosféry; např. parní reforming zemního plynu
<b>Modrý</b>	Výroba z fosilních paliv s využitím technologií CCS (Carbon Capture Storage) nebo CCU (Carbon Capture Utilization)
<b>Tyrkysový</b>	Výroba z fosilních paliv pyrolýzou, vedlejším produktem je uhlík v pevném skupenství
<b>Žlutý</b>	Výroba elektrolýzou při použití elektřiny buď z fotovoltaických elektráren nebo elektřiny ze sítě
<b>Růžový</b>	Výroba elektrolýzou při použití elektřiny vyrobené pouze v jaderných elektrárnách (někdy také <b>fialový</b> )
<b>Zelený</b>	Výroba z obnovitelných zdrojů; např. elektrolýzou při použití elektřiny z obnovitelných zdrojů, parní reforming bioplynu nebo zplyňování biomasy
<b>Bílý</b>	Vodík vyskytující se volně v přírodě / vodík vzniklý jako meziprodukt v jiných procesech

Někdy hromadně jako šedý

Někdy hromadně jako modrý, nebo také nízkoemisní / nízkouhlíkový

Někdy také bezemisní

- Šedý vodík
  - Z fosilních paliv bez zachytávání CO<sub>2</sub> (nejlevnější, nejvíce emisí)
  - V současnosti je většina vodíku vyrobena parním reformingem
  - 95 % veškerého vyrobeného vodíku je šedý vodík
- Modrý (nízkoemisní, nízkouhlíkový)
  - Vodíková strategie ČR sem řadí vodík, při jehož výrobě vznikne maximálně 28,2 g CO<sub>2</sub>/MJ
  - Z fosilních paliv s CCS/CCU (nižší emise, vyšší cena)
  - V úhrnu uhlíkových emisí může být pořád horší než přímé spalování fosilních paliv
- Zelený (bezemisní)
  - Příliš drahé na to, aby byla výroba zeleného vodíku celosvětově rozšířena
- V ČR se vyrábí pouze šedý, případně bílý vodík
- Počítá se s nutností dovozu vodíku z míst jeho výroby

# ZPŮSOBY TRANSPORTU VODÍKU

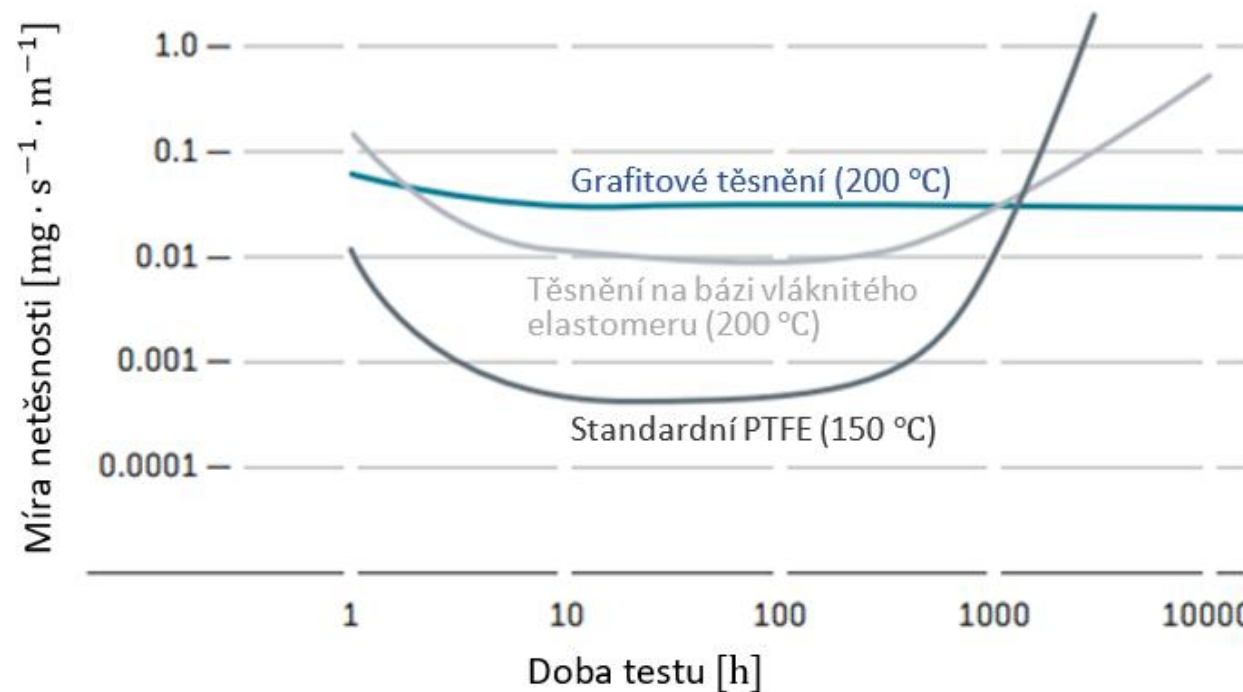
- Potrubí
  - Nová vodíková potrubní síť – vysoké náklady
  - Úprava stávajících plynovodů
  - Do konce roku 2030 má být v rámci evropské iniciativy European Hydrogen Backbone připravena páteřní vodíková přepravní síť
- Silniční a železniční doprava
  - Jako stlačený plyn nebo v kryogenních cisternách

# VODÍKOVÉ PLYNOVODY

- Materiálová kompatibilita jak kovových, tak nekovových částí
- Změna provozních podmínek
- Dostatečná těsnost
  
- Prozatímní směrnice Evropské skupiny pro výzkum potrubí (EPRG)
- ASME B31.12 – Hydrogen Piping and Pipelines

# TĚSNOST

- Vyšší nároky na těsnost
- Úniky lze detekovat pouze speciálními senzory
- Materiálová kompatibilita – jaké těsnění vyberu?



Převzato a upraveno z [Long-term safe sealing of hydrogen with SIGRAFLEX®](#)

# CO JE TĚSNOST?

- Veličina, která udává míru netěsnosti = kolik látky „uteče“
- Často se značí jako  $L$  s indexem, např.  $L_{0,1}$  nebo  $L_{0,01}$
- Index pak udává míru netěsnosti v jednotkách  $[\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$

množství      za čas      na jednotku obvodu  
těsnění (střední průměr)

Třída těsnosti	Míra úniku dusíku (hélia) [mg / (m·s)]	Provozní médium
$L_{1.0}$	1	Voda
$L_{0.1}$	0,1	Voda s obsahem radioaktivních částic; Pára
$L_{0.01}$	0,01	Pára s obsahem radioaktivních částic
$L_{0.001}$	0,001	Vodík

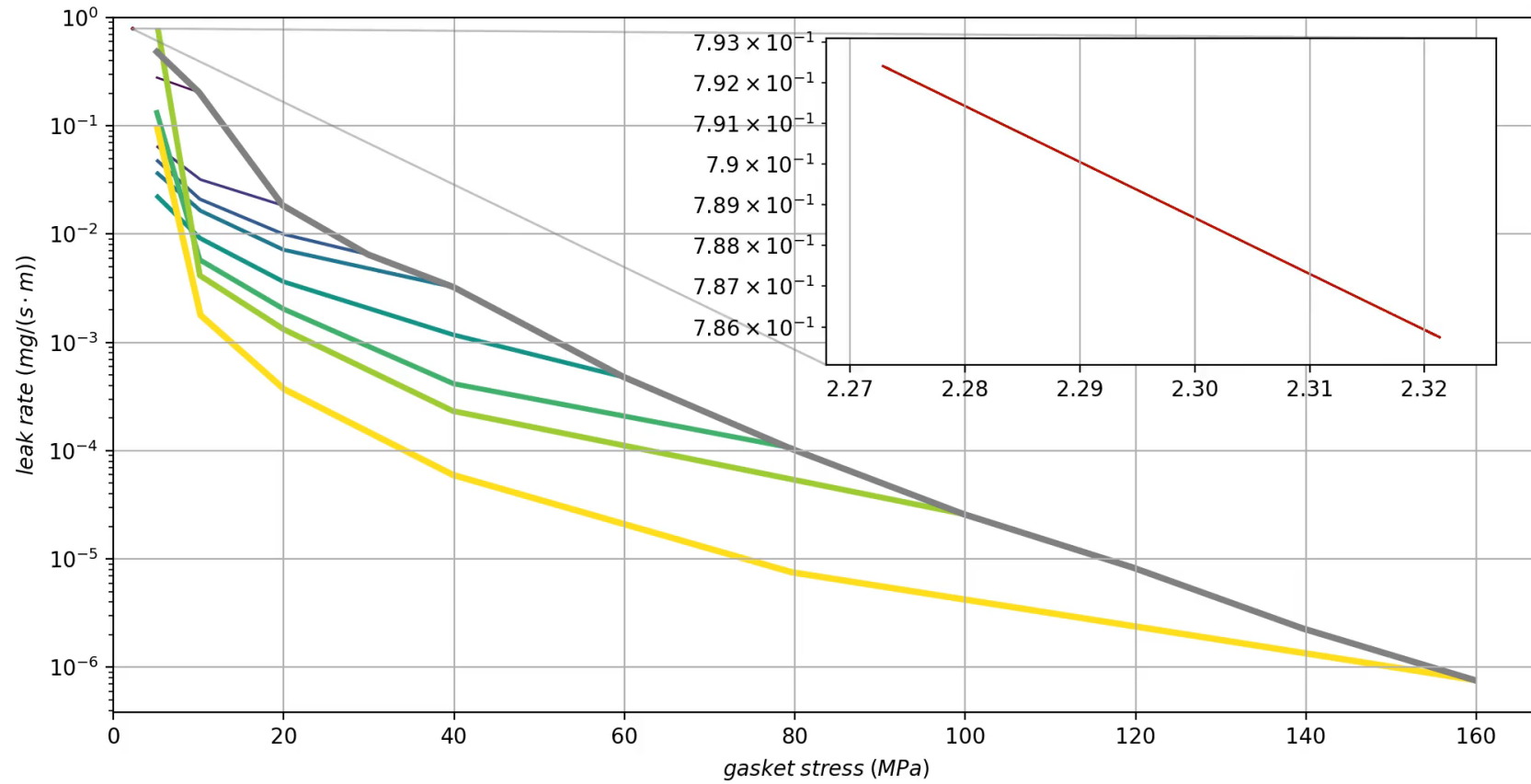
# VLASTNOSTI TĚSNĚNÍ

- Měření dle EN 13555
- Pro každou třídu těsnosti daný minimálně nutný tlak na těsnění

Minimum stress to seal $Q_{\min(L)}$ (at assembly), $Q_{s\min(L)}$ (after off-loading) for $p = 40$ bar ( $T = 23 \pm 2$ °C)												
L [mg/(s·m)]	$Q_{\min(L)}$ [MPa]	$Q_{s\min(L)}$ [MPa]										
		$Q_A = 4.8$ [MPa]	$Q_A = 9.7$ [MPa]	$Q_A = 20$ [MPa]	$Q_A = 30$ [MPa]	$Q_A = 40$ [MPa]	$Q_A = 60$ [MPa]	$Q_A = 80$ [MPa]	$Q_A = 100$ [MPa]	$Q_A = 120$ [MPa]	$Q_A = 140$ [MPa]	$Q_A = 160$ [MPa]
1E-0	5		5	5	5	5	5	5	5			5
1E-1	13			6	5	5	5	5	5			5
1E-2	55						48	23	14			5
1E-3	106											37
1E-4	145											122
1E-5												
1E-6												
1E-7												
1E-8												

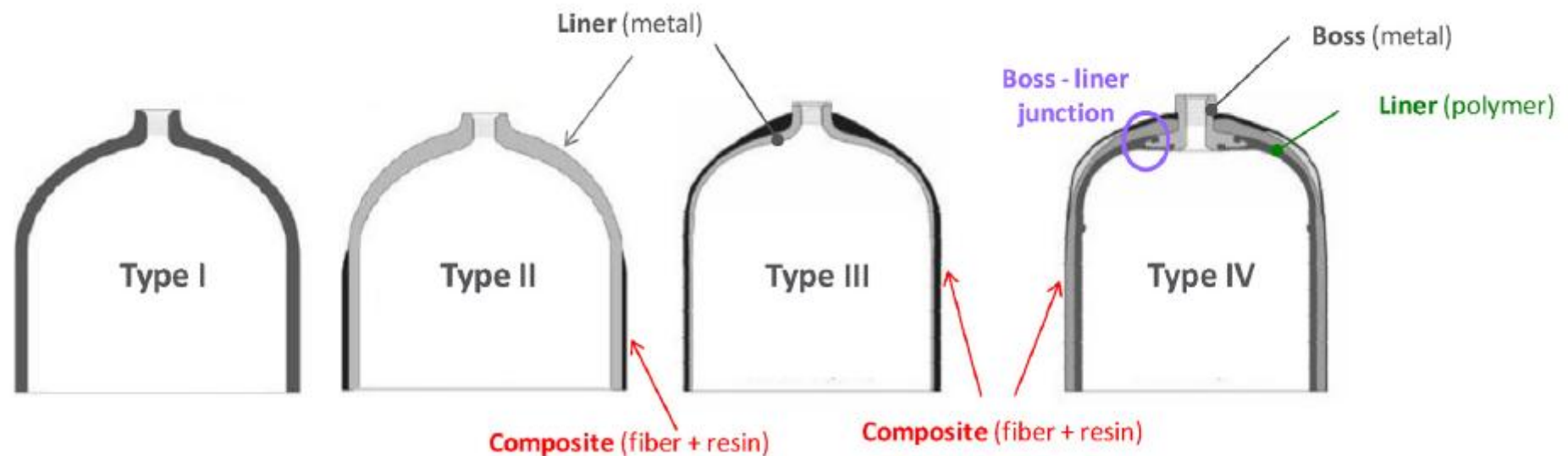
Převzato z [Sigraflex Economy 2 mm](#)

# VLASTNOSTI TĚSNĚNÍ



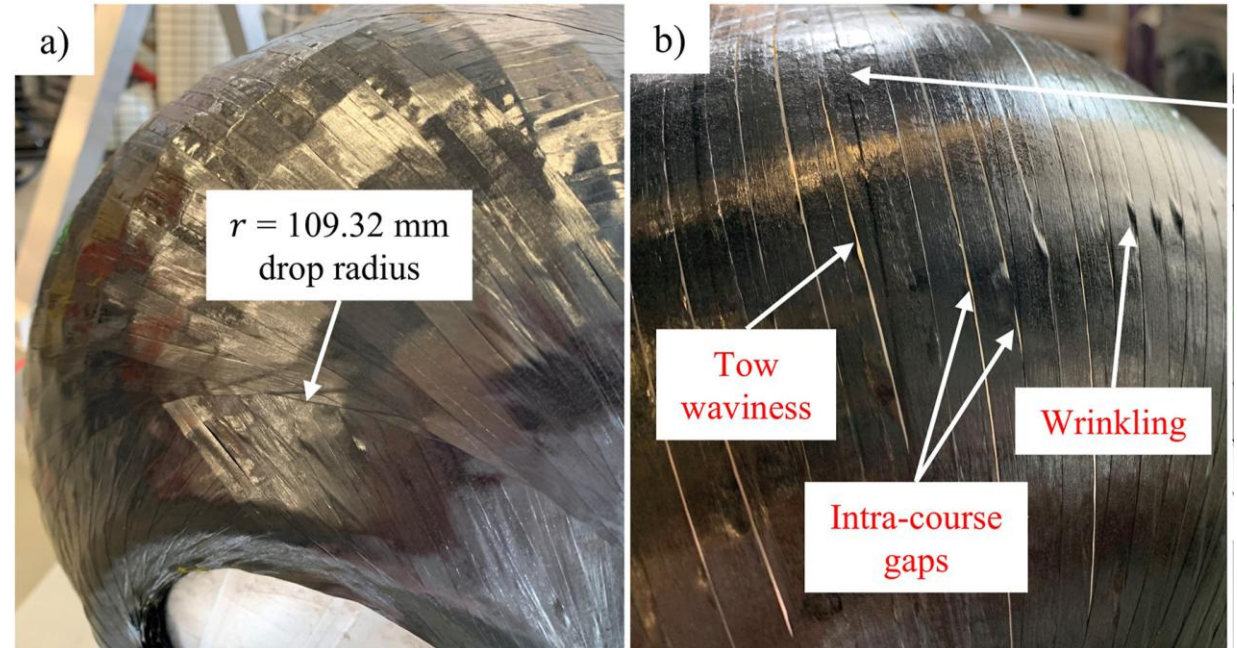
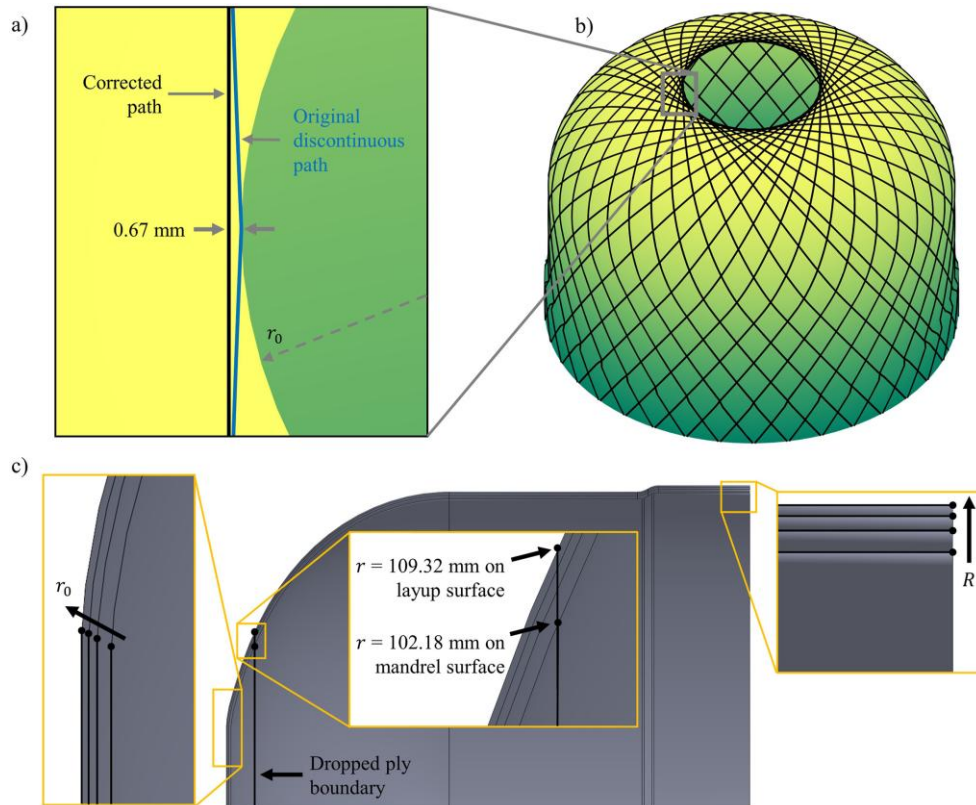
# SKLADOVÁNÍ VODÍKU

- Skladování stlačeného vodíku při tlacích od 20 MPa do 100 MPa



Převzato z [doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.178](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178)

# KOMPOZITNÍ NÁDOBY



Převzato z [doi:10.1016/j.compositesb.2024.111906](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111906)

- Kryogenní skladování
  - Zchlazení na teplotu  $-253\text{ °C}$  (neboli  $20,15\text{ K}$ )
  - Ztráta až 40 % energetického obsahu vodíku
  - Nevýhodou je vypařování (tzv. boil-off), dle velikosti a konstrukce až 0,2 až 1 %/den
  - Výhodou je vyšší efektivita skladování

Plyn	Bod varu (K)	Výparné teplo (kJ/kg)	Minimální práce (kWh/kg)		
			Chlazení NP → bod varu	Kondenzace	Celkem
Vodík	2,28	445,59	2,242	1,666	3,91
Metan	111,63	509,88	0,077	0,230	0,31
Dusík	77,34	201,0	0,055	0,156	0,21
Hélium	4,22	20,9	1,917	0,398	2,32

Převzato a upraveno z [doi:10.1016/B978-0-12-820492-4.00001-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820492-4.00001-4)

- Kryo-stlačování
  - Minimalizace ztrát vypařováním kapalného vodíku při současném zachování vyšší energetické hustoty
  - Teploty kolem 20 K a zároveň vysoký tlak (minimálně 30 MPa)
- Skladování vodíku v pevném stavu = hydridy kovů
  - Chemická absorpce vodíku do kovových slitin nebo komplexních hydridů např.  $\text{MgH}_2$
  - Vodík se uvolňuje zpětně dodáním tepla
- Podzemní skladování
  - Solné kaverny nebo vyčerpaná ložiska zemního plynu
  - Existuje jen málo výzkumných projektů či průmyslového využití

# VODÍK Z POHLEDU PEVNOSTI A ŽIVOTNOSTI ZAŘÍZENÍ



- Vodíkové degradační mechanismy
- Vliv např. na růst trhlin a tím na únavovou životnost
- Při spalování vodíkových směsí budou zařízení namáhána jiným teplotním zatížením
  
- Nutnost ověření materiálové kompatibility (ocelové části, těsnění, potrubní armatury) a kontrolních výpočtů

# VODÍKOVÉ DEGRADAČNÍ MECHANISMY



# VODÍKOVÉ DEGRADAČNÍ MECHANISMY

- Přesné příčiny a způsoby vzniku těchto poškození často nejasné
- Stejně tak je možné v literatuře najít různé odlišnosti v popisu jednotlivých typů degradačních mechanismů
  
- Odborné knihy, články
- API a ASME normy
- ČSN EN ISO 8044 (2020) Koroze kovů a slitin - Slovník

# VODÍKOVÉ DEGRADAČNÍ MECHANISMY

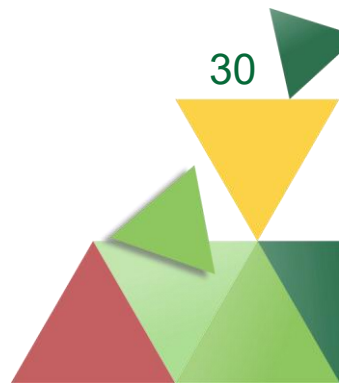
- Do ~ 200 °C
  - Vodíkové křehnutí
  - Vodíkové praskání
  - Vodíkové puchýřování
- Nad ~ 200 °C
  - Vodíkové napadení
- Poškození vzniklé rozpuštěním vodíku v roztaveném kovu
  - Šupiny, rybí oka

- Degradace materiálových vlastností, kdy se snižuje tvárnost a lomová houževnost materiálu a klesá mez pevnosti
- Nejvíce náchylné jsou vysokopevnostní oceli, a to zejména martenzitické
- Difuze atomárního vodíku do kovové mřížky → snížení soudržnosti, vznik mikrotrhlin
- Už od koncentrace 10 ppm vodíku
- Se zvyšující se teplotou pravděpodobnost vodíkové křehkosti klesá, až nad 200 °C zmizí úplně
- Opatření: zjemnění zrna oceli a zrovnoměrnění precipitovaných fází a vměstků, v některých případech lze vodíkovou křehkost odstranit vyžiháním

# VODÍKOVÉ PRASKÁNÍ

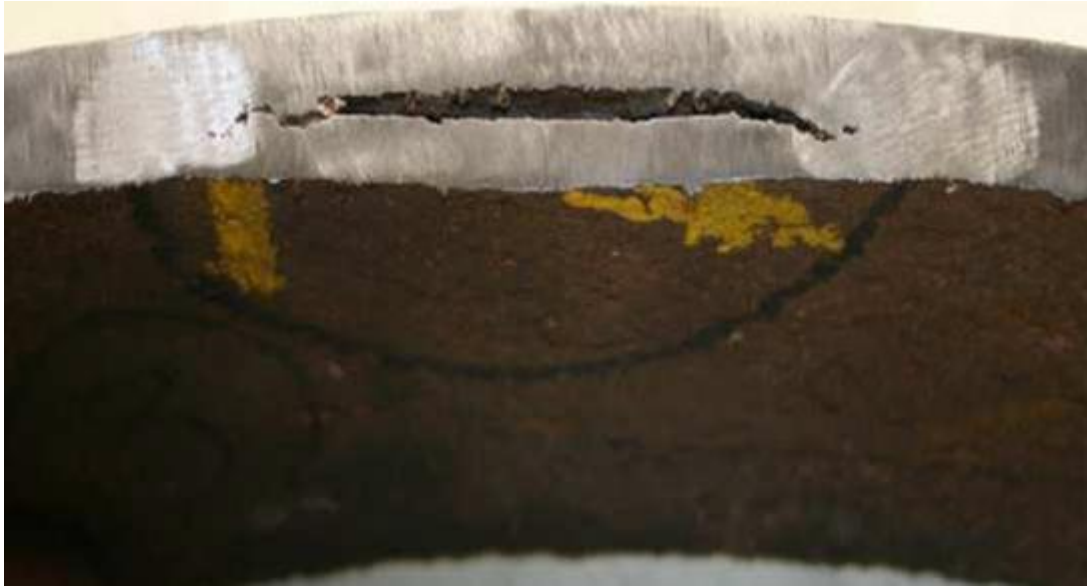
- Vznik a rozvoj vnitřních trhlin, kdy může dojít ke křehkému lomu
- Nízkopevnostní, nízkouhlíkové oceli v prostředí kyselých uhlovodíků, více náchylné jsou oceli s větší hustotou poruch mřížky nebo s tvrdou maticí
- Rekombinace atomárního vodíku do molekul  $H_2$  v místech defektů krystalické mřížky nebo např. v oblasti kořene trhliny
- Opatření: teplotní zpracování ocelí

HYDROGEN INDUCED CRACKING (HIC)

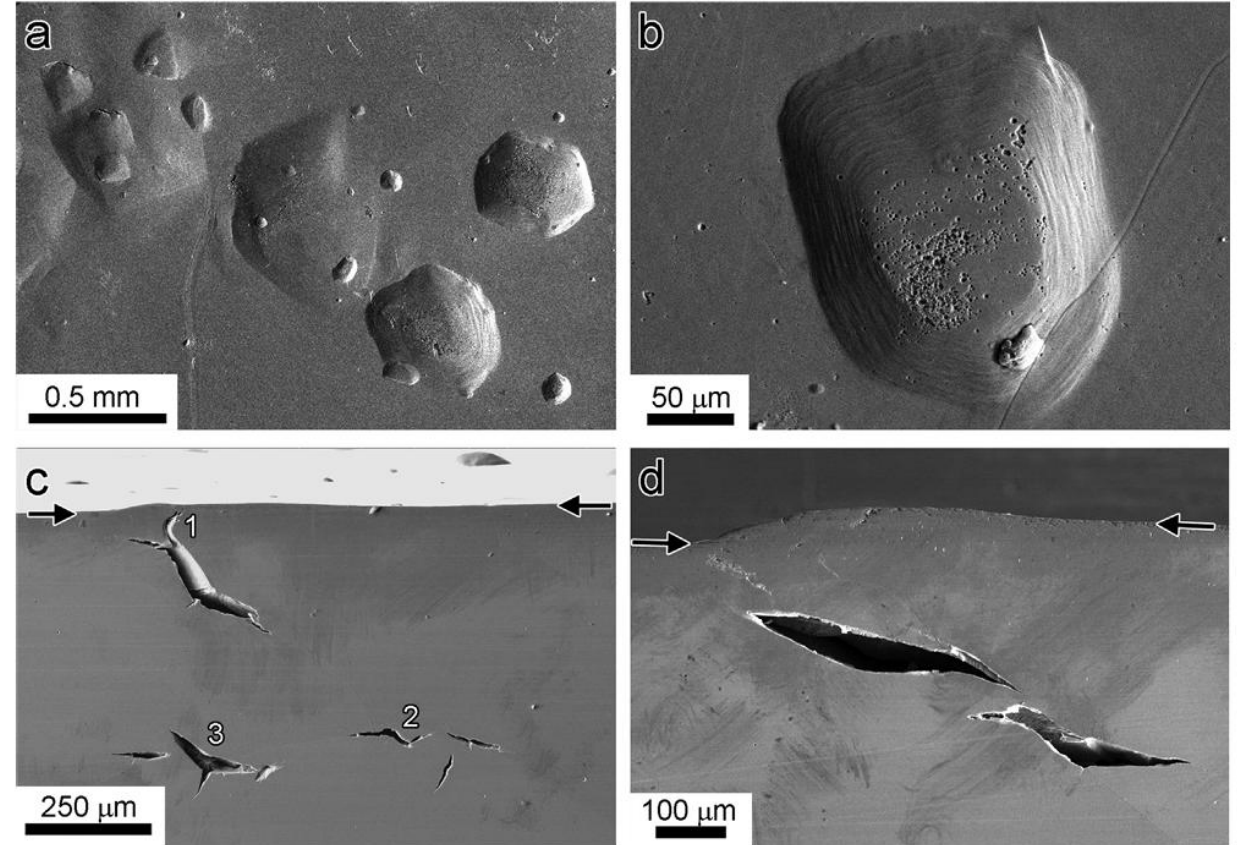


- Stejně jako HIC rekombinací atomárního vodíku do molekul  $H_2$  v místech defektů krystalické mřížky
- Molekuly vodíku nejsou schopny difundovat dále a navyšuje se jejich koncentrace a tlak
- Tlak molekulárního vodíku dostatečně vysoký na to, aby se vytvořila vnitřní dutina nebo trhlina, a pokud je tato trhlina těsně pod povrchem, na povrchu materiálu se vytvoří puchýř
- Nízkopevnostní materiály, vnitřní povrch v kontaktu s kyselým prostředím a vnější povrch se vzduchem

# VODÍKOVÉ PUCHÝŘOVÁNÍ



Převzato z [doi:10.1016/j.engfailanal.2013.02.027](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.027)



Převzato z [doi:10.1016/j.actamat.2016.05.034](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.034)

32

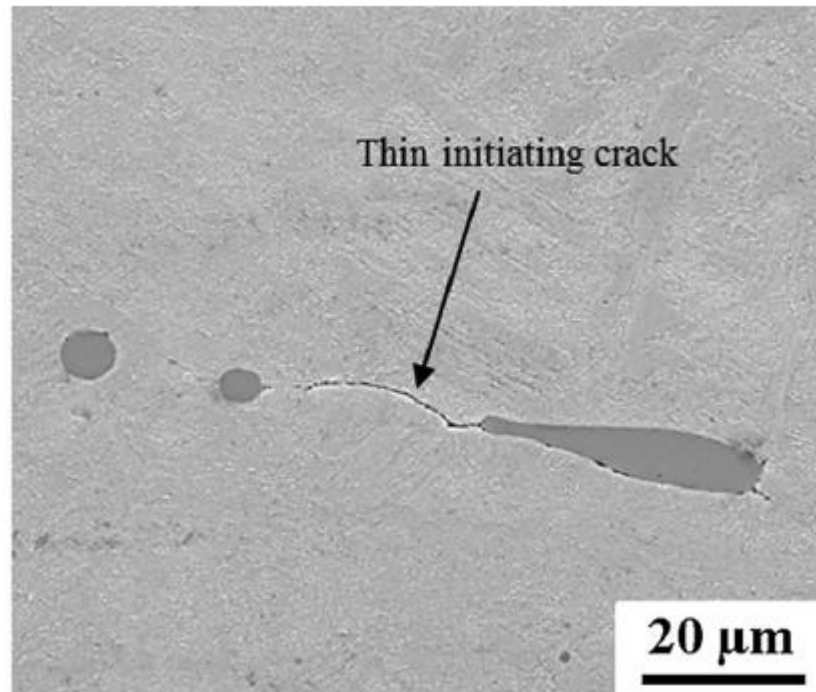
HYDROGEN BLISTERING



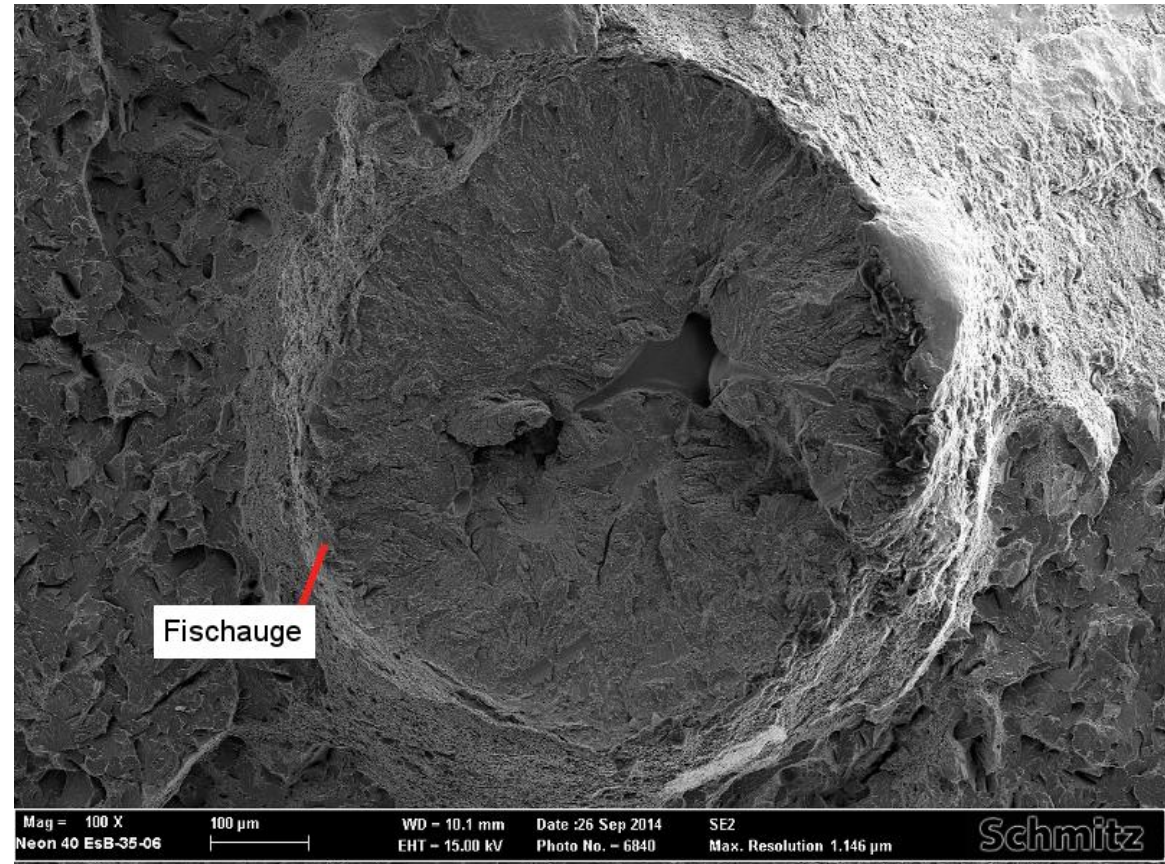
# POŠKOZENÍ VZNIKLÉ PRECIPITACÍ ROZPUŠTĚNÉHO VODÍKU

- Výkovky, svařence a odlitky kvůli vysoké rozpustnosti vodíku v roztaveném nebo nataveném kovu
- Zdrojem vodíku je vodní pára obsažená ve vzduchu, během ochlazování pak vodík difunduje do diskontinuit a poruch mřížky, kde poté precipituje kvůli snížené rozpustnosti vodíku v kovu v pevném skupenství
- Vytváří se tak tzv. šupiny (*flakes*) nebo rybí oka (*fish-eyes*)

# POŠKOZENÍ VZNIKLÉ PRECIPITACÍ ROZPUŠTĚNÉHO VODÍKU



Převzato z [doi:10.1016/j.engfracmech.2019.106546](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106546)



Převzato z [1.6759 | G18NiMoCr3-6 fisheye, hydrogen embrittlement.](#)  
[Schmitz-Metallographie GmbH](#)

- Nevratné poškození uhlíkových a nízkolegovaných ocelí vystavených vodíkovému prostředí za vysokých teplot (nad 200 °C) a vysokého tlaku po delší časový úsek
- Absorbovaný vodík reaguje s uhlíkem a tvoří tak metan, tlak metanu uvězněného v oceli pak vede k tvorbě trhlin a puklin
- Zároveň dochází k oduhličování oceli, což má za následek snižování její pevnosti
- Nejčastěji se s tímto typem poškození setkáme v petrochemickém průmyslu, ale může vést také k poškozování trubek stěn pecí vysokotlakých parogenerátorů

**(HIGH TEMPERATURE) HYDROGEN ATTACK (HTHA)**

# VODÍKOVÉ NAPADENÍ – NELSONOVY KŘIVKY

- Výběru materiálu pro zařízení s možností vzniku vodíkového napadení se věnuje norma API RP 941
- Pro návrh se využívají tzv. Nelsonovy křivky (**experimentální křivky**)
- Sestavují se na základě zkušeností s poškozením různých zařízení
- Aktualizované po nehodě v Tesoro Anacortes Refinery (2010)
- Došlo k výbuchu výměníku tepla a následnému požáru
- 7 pracovníků usmrceno, 1 vážně zraněn
- K nehodě došlo, i když zařízení operovalo v oblasti považované za „bezpečnou“

**(HIGH TEMPERATURE) HYDROGEN ATTACK (HTHA)**

# NEHODA V TESORO ANACORTES REFINERY (2010)

- Nehoda se stala při spouštění výměníku po odstávce – rychlé zahřátí materiálu
- Nádobu se roztrhla ve svarech a uvolněná směs vodíku a nafty vzplála, došlo k výbuchu a následnému požáru
- Oblast svarů byla významně narušena HTHA
- Výměník byl vyroben z uhlíkové oceli, svary nebyly tepelně ošetřeny
- Návrh byl navíc proveden na základě návrhových parametrů, ale skutečné provozní podmínky nebyly měřeny

# NEHODA V TESORO ANACORTES REFINERY (2010)

Pro více informací a video [zde](#)



Figure 8. Post-Incident View of D/E/F NHT Heat Exchanger Bank

Převzato z [Investigation report, Catastrophic rupture of heat exchanger](#)

# POŠKOZENÍ VÝMĚNÍKU

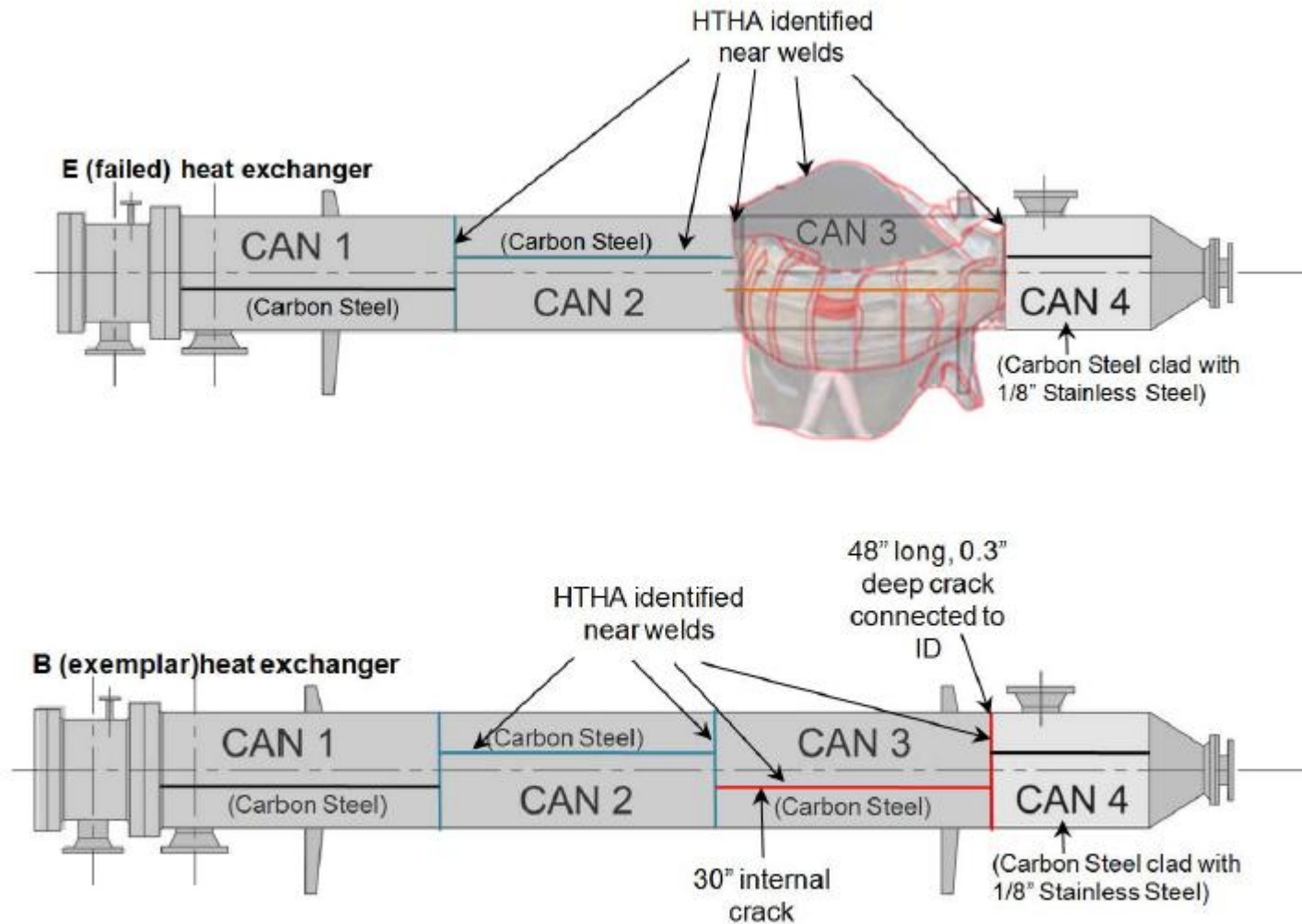
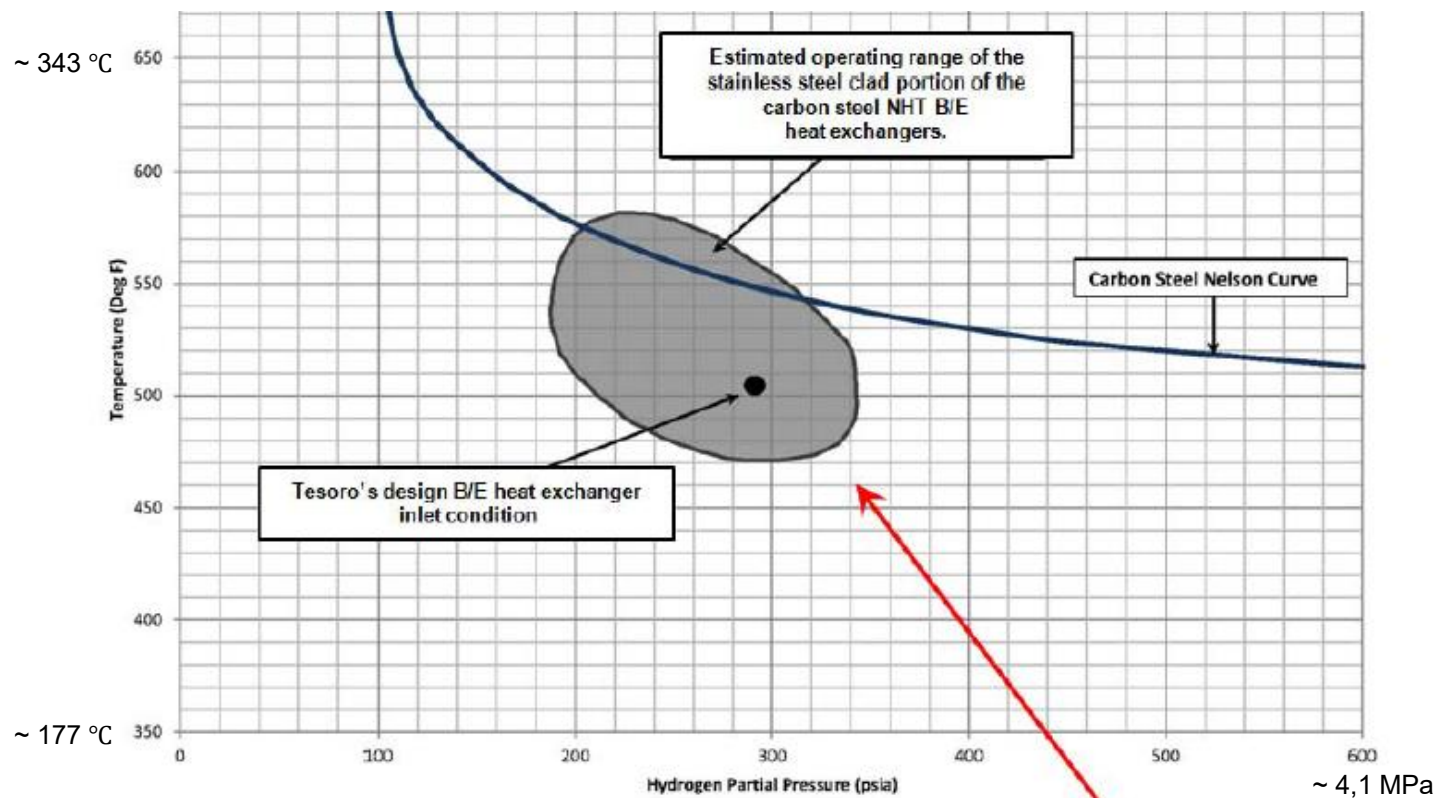
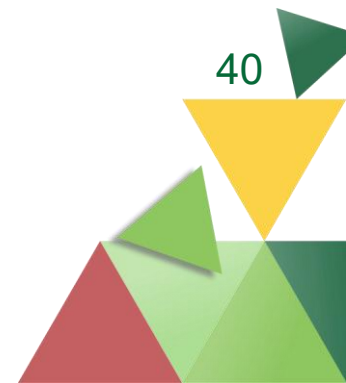
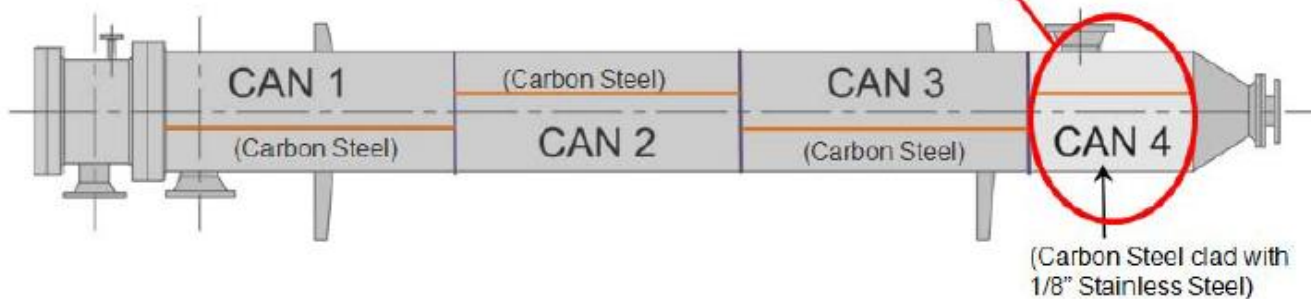


Figure 22. Comparison of Damage Locations in the B and E Heat Exchangers. Severe HTHA damage is found in the B heat exchanger in the same locations where the E heat exchanger ruptured.

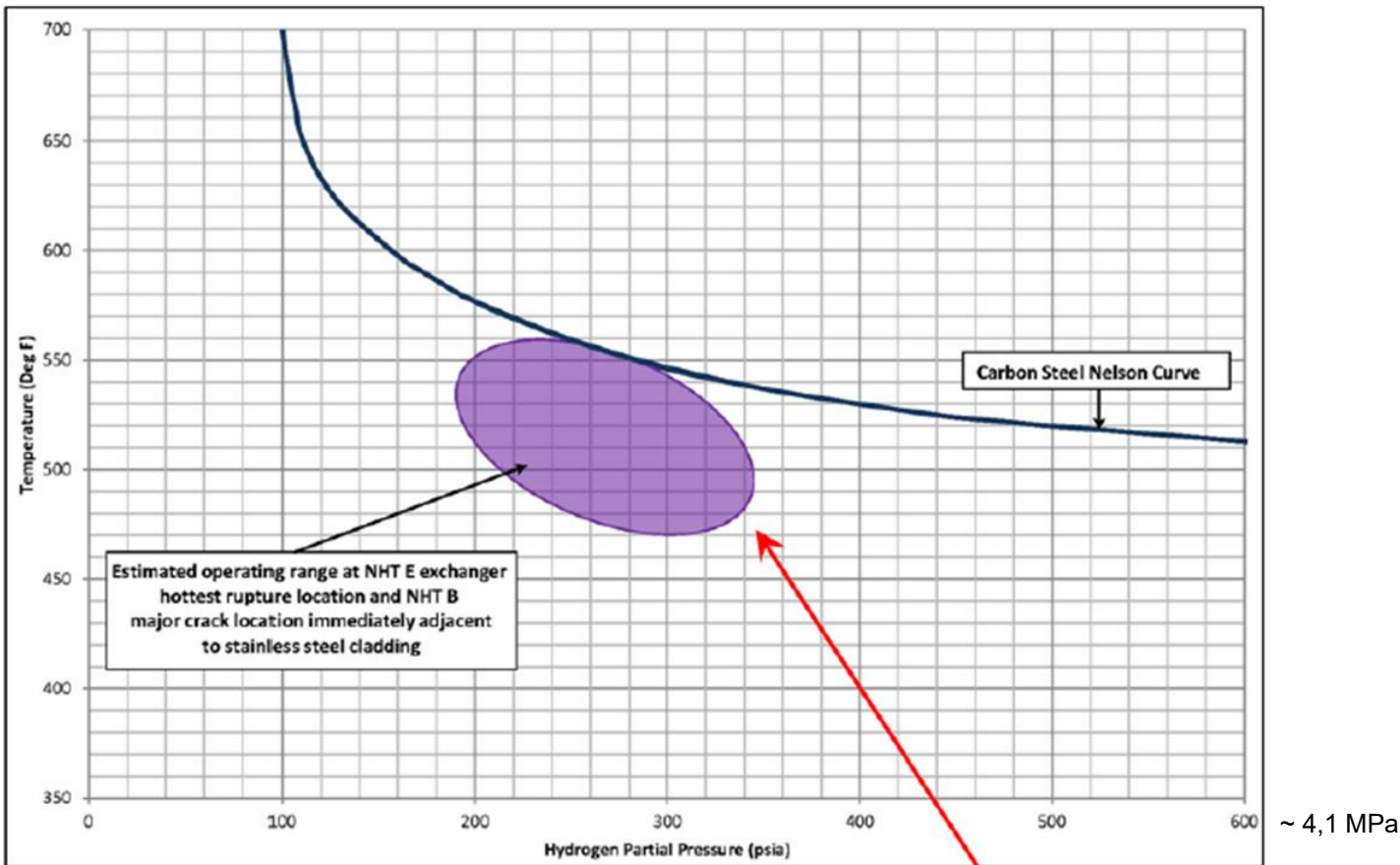
Převzato z [Investigation report, Catastrophic rupture of heat exchanger](#)



**Figure 25. Model Results for Can 4.** The stainless-steel-clad portion of the carbon steel B and E heat exchangers was estimated to occasionally operate above the carbon steel Nelson curve. No HTHA was found in this region, likely because stainless steel cladding reduced the potential for HTHA in the carbon steel beneath it. Tesoro's design B and E process condition used for HTHA evaluation (504 °F (~ 262 °C) and 291 psia (~ 2 MPa) hydrogen partial pressure) did not represent the entire range of heat exchanger operating conditions.



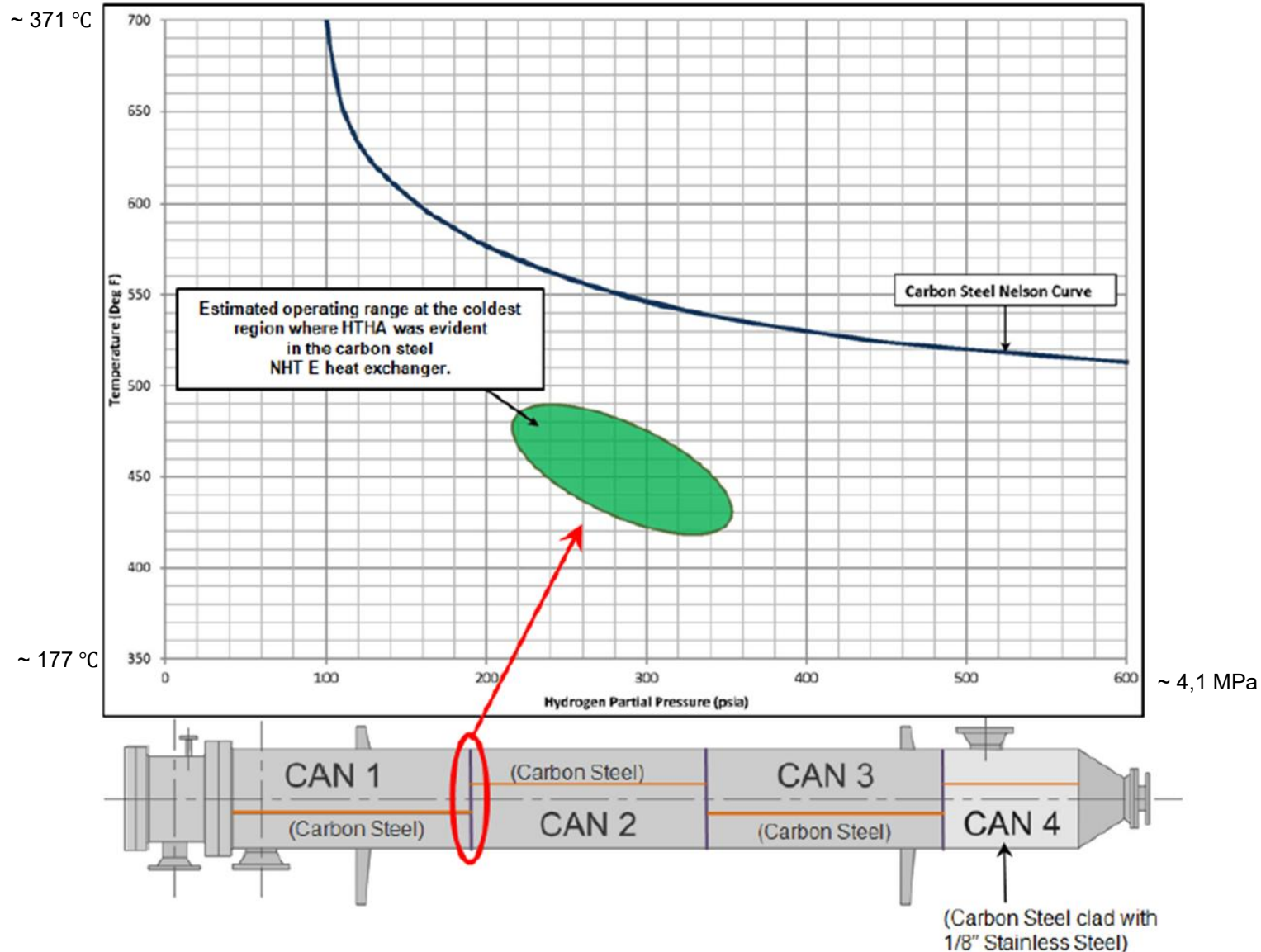
~ 371 °C



~ 177 °C

~ 4,1 MPa

**Figure 26. Model Results for the Weld Downstream of Can 4.** The circumferential weld immediately downstream of the stainless-steel-clad portion of the carbon steel B and E heat exchangers was estimated to operate just below the carbon steel Nelson curve. Extensive HTHA was found in this region, the hottest rupture location of the E heat exchanger and the major crack location of the B heat exchanger.



**Figure 27. Model Results for the Coldest Region of the E Heat Exchanger.** The coldest region of the E heat exchanger with evident HTHA was estimated to operate as much as 120 °F (~ 49 °C) below the carbon steel Nelson curve.

# PŘÍČINY NEHODY

- I přesto, že dle Nelsonových křivek nemělo dojít k poškození HTHA, k němu došlo. Napadá vás proč?

- API 941
  - Návrh vzhledem k možnému poškození vodíkovým napadením
- API 579-1 (nebo také ASME FFS-1) Fitness For Service
  - Poškození už se objevilo – dokážu ho změřit
  - Bezpečnost dalšího provozu
  - Vodíkové puchýře, vodíkové praskání, napětově orientované vodíkové praskání
  - Více probereme v následujícím příkladu
- Kromě těchto vodíkových degradačních mechanismů má vodík vliv i při jiných způsobech poškozování – ovlivňuje např. rychlost růstu únavové trhliny a tím i celkovou životnost zařízení. Vliv vodíku může být zásadní a při návrhu zařízení a výpočtu životnosti by se tento jev měl vzít v úvahu i přesto, že to nemusí být vyžadováno příslušnými normami.

# VYHODNOCENÍ VODÍKOVÉHO POŠKOZENÍ NA ZÁKLADĚ NORMY API 579-1



# OPAKOVÁNÍ: TYPY VODÍKOVÉHO POŠKOZENÍ

Vodíkové praskání, *Hydrogen induced cracking* (HIC)

Vznik a rozvoj rovinných trhlin i bez vnějšího zatížení.

Napětově orientované vodíkové praskání, *Stress oriented hydrogen induced cracking* (SOHIC)

Trhliny vznikající kolmo ke směru (tahového) napětí, které propojují už vzniklé HIC trhliny.

Vodíkové puchýřování, *Hydrogen blistering* (HB)

Způsobeny tlakem molekulárního vodíku pod povrchem, dochází k plastické deformaci.

Vodíkové křehnutí, *Hydrogen embrittlement* (HE)

Degradace materiálových vlastností, ztráta tvárnosti, houževnatosti, pokles meze pevnosti.

Poškození vzniklé precipitací rozpuštěného vodíku v tekutém kovu

Šupiny (*flakes*), rybí oka (*fish eyes*)

Vodíkový útok, *High temperature hydrogen attack* (HTHA)

Vzniká za vysokých teplot a tlaků – kombinace oduhličení ocele a následného vzniku metanu.

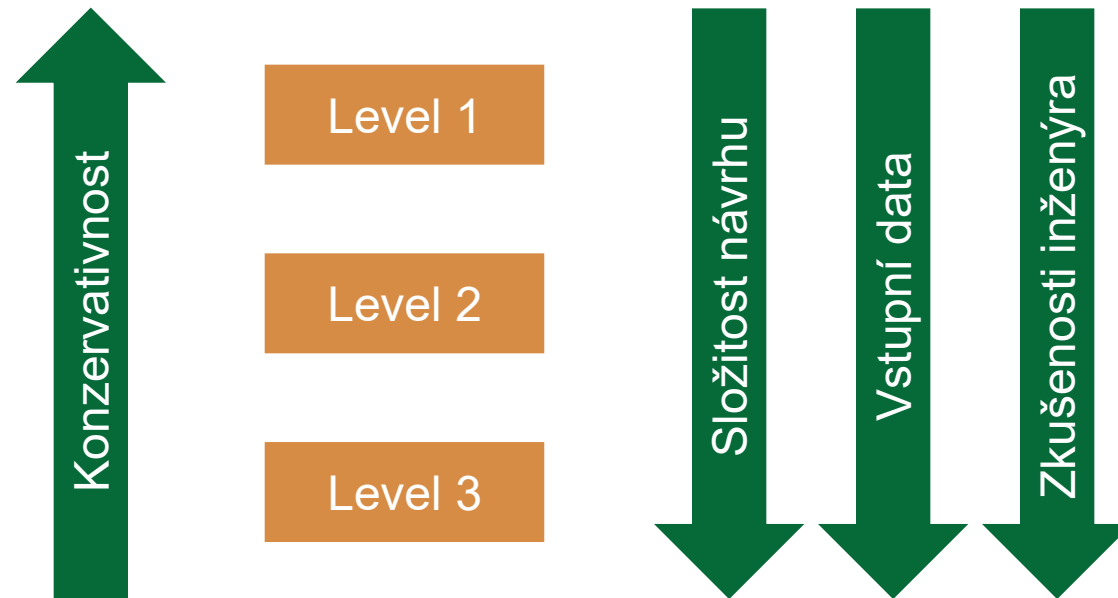
# API 579-1 (ASME FFS-1) FITNESS-FOR-SERVICE

Norma API 579-1 se týká posuzování **dalšího provozu a zbývajících životnosti** tlakových zařízení pomocí metod hodnocení vhodnosti pro provoz.

- Týká se zařízení, která jsou v provozu a předpokládá se u nich nebo se už objevilo poškození (trhliny apod.)
- Je bezpečné zařízení s touto vadou provozovat?
- Jaká je zbývajících životnost?
- Jakým způsobem lze provést oprava zařízení?
- V evropském rámci podobná norma zatím není vytvořena

# API 579-1 OBECNĚ

Pro každý typ poškození norma nabízí tři úrovně hodnocení (Level 1, 2, 3), které se od sebe liší složitostí a mírou potřebných vstupních dat.



# VODÍKOVÉ POŠKOZENÍ V API 579-1, KAPITOLA 7

- Metoda platí pro tlaková zařízení z nízkopevnostních feritických ocelí pracující za teplot nižších než 204 °C
- Vyhodnocení HIC, SOHIC a vodíkových puchýřů
- Ve všech případech lze pouze vyhodnotit, zda je bezpečné dále zařízení provozovat bez oprav, nedokážeme však určit časový rámec zbývající životnosti



# VÝPOČET



# POŠKOZENÉ ZAŘÍZENÍ

- Jedná se o tlakovou nádobu používanou při výrobě LPG, konkrétně během odstraňování sirovodíku
- Po dvou letech provozu musela být nádoba vyměněna



Převzato z [doi:10.1016/j.engfailanal.2013.02.027](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.027)

# ZADÁNÍ

- Vytvořte výpočetní program pro vyhodnocení vodíkových puchýřů
- Primárně využijte Python, ale můžete využít cokoli
- Odevzdejte výstup – vyhodnocení zařízení dle normy API 579-1

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

**KROK 1:** Sesbírejte potřebné vstupní údaje.

Vnitřní průměr nádoby	$D_i$ [mm]	1 300
Obvodový součinitel svaru	$E_C$ [–]	0,85
Podélný součinitel svaru	$E_L$ [–]	0,85
Budoucí korozní přídavek	$FCA$ [mm]	0
Dovolené namáhání	$S_E$ [MPa]	144
Rovnoměrná tloušťka mimo oblast poškození (změřená v době inspekce)	$t_{rd}$ [mm]	18

# VSTUPNÍ HODNOTY

Označení puchýře		1	2	3	4
Rozměr puchýře v podélném směru	$s$ [mm]	120	90	110	130
Rozměr puchýře v obvodovém směru	$c$ [mm]	56	46	49	78
Vzdálenost od okraje k nejbližšímu puchýři	$L_B$ [mm]	197,87	197,87	95,01	95,01
Směr vyboulení (dovnitř/ven)		ven	ven	ven	ven
Výčnělek puchýře	$B_p$ [mm]	2	1	1	4
Minimální naměřená tloušťka	$t_{mm}$ [mm]	8	8	8	8
Trhliny na okraji		ano	ne	ne	ano
Trhliny na vrcholku nebo odvzdušnění		trhlina	ne	trhlina	trhlina
Délka trhliny na vrcholku nebo průměr odvzdušňovacího otvoru	$s_c$ [mm]	9	-	9	9
Vzdálenost od nejbližšího svaru	$L_w$ [mm]	278,5	583,6	702,85	877,1
Vzdálenost k nejbližší strukturální diskontinuitě	$L_{msd}$ [mm]	748,57	823,37	678,79	484,54

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

**KROK 2:** Určete výpočtovou tloušťku stěny a výpočtový vnitřní průměr.

$$t_c = t_{rd} - FCA$$

$$D = D_i + 2 \cdot FCA$$

Pokud je vzdálenost mezi dvěma sousedními oblastmi s puchýři (měřená mezi jejich okraji) menší nebo rovna dvojnásobku výpočtové tloušťky, měly by být tyto puchýře sloučeny a hodnoceny jako jediný puchýř.

$$L_B \leq 2 \cdot t_c$$

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

**KROK 3:** Pokud jsou všechny následující podmínky splněny, pokračujte ke kroku 4. Pokud nejsou, hodnocení na úrovni Level 1 není vyhovující.

(1) Je splněno jedno z následujících kritérií:

- i. Průměr puchýře je menší nebo roven 50 mm

$$\max(s, c) \leq 50 \text{ mm}$$

- i. Puchýř je odvětrán buď záměrně nebo prasklinou na vrcholu a rozměry splňují

$$\max(s, c) \leq 0,6 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

(2) Minimální naměřená nepoškozená tloušťka měřená od nevypuklého povrchu splňuje podmínku:

$$t_{mm} \geq 0,5 \cdot t_c$$

(3) Výčnělek puchýře splňuje

$$B_p \geq 0,1 \cdot \min(s, c)$$

(4) Puchýř nemá okrajové praskliny

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

(5) Vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližším svarem splňuje

$$L_w > \max(2 \cdot t_c, 25 \text{ mm})$$

(6) Vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližší významnou strukturální diskontinuitou splňuje

$$L_{msd} > 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

**KROK 4:** Hodnocení úrovně 1 je dokončeno, zařízení může být vráceno do provozu.

Pokud komponenta nespĺňuje požadavky hodnocení úrovně 1, lze zvážit následující opatření, nebo jejich kombinaci

- a) Poškozený materiál může být odstraněn, opraven nebo nahrazen
- b) Poškození může být odstraněno broušením a oblast může být vyhodnocena jako lokální ztenčení podle postupů v části 5
- c) Může být provedeno hodnocení úrovně 2 nebo 3



# LEVEL 2



# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 1:** Sesbírejte potřebné vstupní údaje.

**KROK 2:** Určete výpočtovou tloušťku stěny a výpočtový vnitřní průměr.

$$t_c = t_{rd} - FCA$$

$$D = D_i + 2 \cdot FCA$$

Pokud je vzdálenost mezi dvěma sousedními oblastmi s puchýři (měřená mezi jejich okraji) menší nebo rovna dvojnásobku výpočtové tloušťky, měly by být tyto puchýře sloučeny a hodnoceny jako jediný puchýř.

$$L_B \leq 2 \cdot t_c$$

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 3:** Pokud vzdálenost od okraje puchýře k nejbližší významné strukturální diskontinuitě splňuje následující podmínku, pokračujte ke KROKU 4. Jinak hodnocení úrovně 2 není splněno.

$$L_{msd} > 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

**KROK 4:** Pokud má puchýř obvodové trhliny směrem k vnitřní nebo vnější ploše, pokračujte ke KROKU 5. Jinak pokračujte ke KROKU 6.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 5:** Pokud je puchýř vyboulen směrem k vnitřní ploše a má obvodové trhliny směrem k vnější ploše, nebo pokud je puchýř vyboulen směrem k vnější ploše a má obvodové trhliny směrem k vnitřní ploše (tj. obvodové trhliny jsou na opačné straně než vyboulení), pak puchýř neprojde hodnocením úrovně 2. Pokud jsou obvodové trhliny na stejné straně jako vyboulení, pokračujte ke KROKU 9.

**KROK 6:** Pokud puchýř nemá trhlinu v koruně, pokračujte ke KROKU 7. Pokud má puchýř trhlinu v koruně, pokračujte ke KROKU 9.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 7:** Pokud výčnělek puchýře nad povrchem splňuje následující rovnici, pokračujte ke KROKU 8. Jinak pokračujte ke KROKU 9.

$$B_p \geq 0,1 \cdot \min(s, c)$$

**KROK 8:** Pokud je puchýř odvětrán, pokračujte ke KROKU 10. Pokud není odvětrán, pokračujte ke KROKU 11.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 9:** Puchýř bude vyhodnocen jako ekvivalentní oblast lokálního ztenčení metodami z části 5. Zbývající tloušťka nepoškozeného materiálu pro analýzu lokálního ztenčení je  $t_{mm}$ .

Postup výpočtu dle kapitoly 5 najdete na dalších slidech.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 10:** Pokud vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližším svarovým spojem splňuje následující rovnici, pokračujte ke KROKU 12; jinak pokračujte ke KROKU 11.

$$L_w > \max(2 \cdot t_c, 25 \text{ mm})$$

**KROK 11:** Je nutné vyvinout systém monitorování v provozu, který bude sledovat růst puchýře během provozu komponenty. Poté pokračujte ke KROKU 12.

**KROK 12:** Hodnocení úrovně 2 je dokončeno, zařízení může být vráceno do provozu.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

Pokud komponenta nespĺňuje požadavky hodnocení úrovně 2, pak lze zvážit následující opatření, nebo jejich kombinaci:

- a) Komponenta může být přehodnocena a postupy hodnocení úrovně 2 opakovány
- b) Poškozený materiál může být odstraněn, opraven nebo nahrazen
- c) Může být provedeno hodnocení úrovně 3

Kapitola 5 se zabývá lokální ztrátou materiálu. Jakou úroveň hodnocení zvolit?

## ● Level 1

- **komponenty typu A zatížené vnitřním tlakem, charakterizace lokálního úbytku jednou tloušťkou s jedním nebo dvěma rozměry povrchové plochy**

## ● Level 2

- komponenty typu A nebo typu B, třídy 1, která je vystavena vnitřnímu tlaku, pokud v oblasti úbytku materiálu dochází k významným změnám v profilu tloušťky
- komponenty typu A nebo typu B, třídy 1, válcového tvaru, která je vystavena vnějšímu tlaku a doplňkovým zatížením

## ● Level 3

- hodnocení komponent, které neprošly hodnocením úrovně 1 a 2
- komponent s komplikovanou geometrií a/nebo oblastmi lokalizovaného úbytku materiálu

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 4:** Určete poměr zbývající tloušťky a parametr délky podélné vady:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c}$$

$$\lambda = \frac{1,285 \cdot s}{\sqrt{D \cdot t_c}}$$

**KROK 5:** Zkontrolujte kritéria mezní velikosti vady; pokud jsou splněny následující požadavky, pokračujte ke KROKU 6; jinak není vada podle postupu hodnocení úrovně 1 přijatelná.

$$R_t \geq 0,2$$

$$t_{mm} - FCA \geq 2,5 \text{ mm}$$

$$L_{msd} \geq 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 6:** ... pokračujte na KROK 7. (vždy splněno v případě vodíkových puchýřů)

**KROK 7:** Určete maximální přípustný pracovní tlak (maximum allowable working pressure *MAWP*).

Uvažujte  $t_{sl} = 0$  mm (doplňková tloušťka pro mechanická zatížení jiná než tlak, která způsobují podélné napětí).

Obvodový směr

$$MAWP_c = \frac{S_E \cdot E \cdot t_c}{R + 0,6 \cdot t_c}$$

Podélný směr

$$MAWP_L = \frac{2 \cdot S_E \cdot E \cdot (t_c - t_{sl})}{R - 0,4 \cdot (t_c - t_{sl})}$$

$$MAWP = \min(MAWP_c, MAWP_L)$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 8:** Pokud bod definovaný průsečíkem vypočítaných hodnot  $\lambda$  a  $R_t$  leží na nebo nad křivkou (rovnice křivky na dalším slidu), je podélný rozsah vady přijatelný pro provoz při *MAWP* určeném v KROKU 7.

Pokud vada není přijatelná, určete RSF (Remaining Strength Factor) pomocí následující rovnice, kde pro  $\lambda = 1,008$  platí  $M_t = 1,199$ .

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t} \cdot (1 - R_t)}$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1 – URČENÍ $M_t$

Určení hodnoty  $M_t$  ze známé hodnoty  $\lambda$  (pro hodnoty  $\lambda > 20$  se do výpočtu uvažuje  $\lambda = 20$ ):

$$\begin{aligned} M_t &= 1,0010 - 0,014195 \cdot \lambda + 0,29090 \cdot \lambda^2 - 0,096420 \cdot \lambda^3 + 0,02089 \cdot \lambda^4 - 0,0030540 \cdot \lambda^5 \\ &+ 2,9570 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^6 - 1,8462 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^7 + 7,1553 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^8 - 1,5631 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^9 + 1,4656 \\ &\cdot 10^{-10} \cdot \lambda^{10} \end{aligned}$$

Rovnice křivky:

$$R_t = \begin{cases} 0,2 & \lambda \leq 0,354 \\ \left( RSF_a - \frac{RSF_a}{M_t} \right) \cdot \left( 1,0 - \frac{RSF_a}{M_t} \right)^{-1} & 0,354 < \lambda \leq 20 \\ 0,9 & \lambda \geq 20 \end{cases}$$

kde  $RSF_a = 0,9$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

Doporučená hodnota pro povolený zbývající faktor pevnosti (allowable Remaining Strength Factor) je  $RSF_a = 0,9$ .

- Pokud  $RSF \geq RSF_a$ , pak je oblast lokálního úbytku materiálu přijatelná pro provoz při  $MAWP$  určeném v KROKU 7.
- Pokud  $RSF < RSF_a$ , pak je oblast lokálního úbytku materiálu přijatelná pro provoz při  $MAWP_r$ , kde  $MAWP_r$  se vypočítá pomocí následující rovnice.

$$MAWP_r = MAWP \cdot \frac{RSF}{RSF_a}$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 9:** Hodnocení je dokončeno pro všechny typy komponent kromě válcových skořepin, kuželových skořepin a kolen. Pokud je komponenta válcová skořepina, kuželová skořepina nebo koleno, vyhodnoťte obvodový rozsah vady.

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

- Pokud je následující podmínka splněna, je obvodový rozsah vady přijatelný a žádné další hodnocení není potřeba. Jinak pokračujte dál.

$$c \leq 2 \cdot s \cdot \frac{E_L}{E_C}$$

- Spočítejte minimální potřebnou tloušťku  $t_{min}^L$ .

$$t_{min}^L = \frac{MAWP_r \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot MAWP_r} + t_{sl}$$

- Pokud je následující podmínka splněna, je obvodový rozsah vady přijatelný a žádné další hodnocení není potřeba. Jinak pokračujte dál.

$$t_{min}^L \leq t_{mm} - FCA$$

- $MAWP_r$  komponenty lze upravit pomocí následující rovnice. Jinak může být provedeno hodnocení úrovně 2 nebo 3. Upozorňujeme, že  $MAWP_r$  na pravé straně rovnice je určen v KROKU 8.

$$MAWP_r = MAWP_r \cdot \left( \frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}^L} \right)$$



# ŘEŠENÍ



# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

**KROK 1:** Sesbírejte potřebné vstupní údaje.

**KROK 2:** Určete výpočtovou tloušťku stěny a výpočtový vnitřní průměr.

$$t_c = t_{rd} - FCA = 18 - 0 = 18 \text{ mm}$$

$$D = D_i + 2 \cdot FCA = 1300 + 2 \cdot 0 = 1300 \text{ mm}$$

Pokud je vzdálenost mezi dvěma sousedními oblastmi s puchýři (měřená mezi jejich okraji) menší nebo rovna dvojnásobku výpočtové tloušťky, měly by být tyto puchýře sloučeny a hodnoceny jako jediný puchýř.

$$L_B \leq 2 \cdot t_c$$

$$197,87 \text{ mm} \leq 36 \text{ mm}$$

neplatí

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

**KROK 3:** Pokud jsou všechny následující podmínky splněny, pokračuj ke kroku 4. Pokud nejsou, hodnocení na úrovni Level 1 není vyhovující.

(1) Je splněno jedno z následujících kritérií:

- i. Průměr puchýře je menší nebo roven 50 mm

$$\max(s, c) \leq 50 \text{ mm}$$

$$\max(120, 56) \leq 50$$

neplatí

- i. Puchýř je odvětrán buď záměrně nebo prasklinou na vrcholu a rozměry splňují

$$\max(s, c) \leq 0,6 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

$$\max(120, 56) \leq 0,6 \cdot \sqrt{1300 \cdot 18}$$

$$120 \leq 91,78$$

neplatí

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

(2) Minimální naměřená nepoškozená tloušťka měřená od nevypuklého povrchu splňuje podmínku:

$$t_{mm} \geq 0,5 \cdot t_c$$

$$8 \leq 0,5 \cdot 18$$

neplatí

(3) Výčnělek puchýře splňuje

$$B_p \geq 0,1 \cdot \min(s, c)$$

$$8 \geq 0,1 \cdot \min(120, 56)$$

platí

(4) Puchýř nemá okrajové praskliny

Neplatí



# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

(5) Vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližším svarem splňuje

$$L_w > \max(2 \cdot t_c, 25 \text{ mm})$$
$$278,5 > \max(2 \cdot 18, 25 \text{ mm})$$

platí

(6) Vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližší významnou strukturální diskontinuitou splňuje

$$L_{msd} > 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$
$$748,57 > 1,8 \cdot \sqrt{1300 \cdot 18}$$
$$748,57 > 275,35$$

platí

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 1

Protože všechny podmínky v KROKU 3 nejsou splněny, výpočet na úrovni **LEVEL 1 nevyhovuje**. Bude proveden výpočet na úrovni LEVEL 2.



# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 1:** Sesbírejte potřebné vstupní údaje.

**KROK 2:** Určete výpočtovou tloušťku stěny a výpočtový vnitřní průměr.

$$t_c = t_{rd} - FCA = 18 - 0 = 18 \text{ mm}$$

$$D = D_i + 2 \cdot FCA = 1300 + 2 \cdot 0 = 1300 \text{ mm}$$

Pokud je vzdálenost mezi dvěma sousedními oblastmi s puchýři (měřená mezi jejich okraji) menší nebo rovna dvojnásobku výpočtové tloušťky, měly by být tyto puchýře sloučeny a hodnoceny jako jediný puchýř.

$$L_B \leq 2 \cdot t_c$$

neplatí

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 3:** Pokud vzdálenost od okraje puchýře k nejbližší významné strukturální diskontinuitě splňuje následující podmínku, **pokračujte ke KROKU 4**. Jinak hodnocení úrovně 2 není splněno.

$$L_{msd} > 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$
$$748,57 > 1,8 \cdot \sqrt{1300 \cdot 18}$$
$$748,57 > 275,35$$

platí

**KROK 4:** Pokud má puchýř obvodové trhliny směrem k vnitřní nebo vnější ploše, pokračujte ke KROKU 5. Jinak pokračujte ke KROKU 6.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 5:** Pokud je puchýř vyboulen směrem k vnitřní ploše a má obvodové trhliny směrem k vnější ploše, nebo pokud je puchýř vyboulen směrem k vnější ploše a má obvodové trhliny směrem k vnitřní ploše (tj. obvodové trhliny jsou na opačné straně než vyboulení), pak puchýř neprojde hodnocením úrovně 2. **Pokud jsou obvodové trhliny na stejné straně jako vyboulení, pokračujte ke KROKU 9.**

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 9:** Puchýř bude vyhodnocen jako ekvivalentní oblast lokálního ztenčení metodami z části 5. Zbývající tloušťka nepoškozeného materiálu pro analýzu lokálního ztenčení je  $t_{mm}$ .

Následuje výpočet dle kapitoly 5.

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 4:** Určete poměr zbývající tloušťky a parametr délky podélné vady:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c}$$

$$R_t = \frac{8 - 0}{18}$$

$$R_t = 0,444$$

$$\lambda = \frac{1,285 \cdot s}{\sqrt{D \cdot t_c}}$$

$$\lambda = \frac{1,285 \cdot 120}{\sqrt{1300 \cdot 18}}$$

$$\lambda = 1,008$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 5:** Zkontrolujte kritéria mezní velikosti vady; pokud jsou splněny následující požadavky, **pokračujte ke KROKU 6**; jinak není vada podle postupu hodnocení úrovně 1 přijatelná.

$$R_t \geq 0,2$$

$$0,444 \geq 0,2$$

platí

$$t_{mm} - FCA \geq 2,5 \text{ mm}$$

$$8 \text{ mm} \geq 2,5 \text{ mm}$$

platí

$$L_{msd} \geq 1,8 \cdot \sqrt{D \cdot t_c}$$

$$748,57 \text{ mm} \geq 1,8 \cdot \sqrt{1300 \cdot 18} \text{ mm}$$

$$748,57 \text{ mm} \geq 275,347 \text{ mm}$$

platí

**KROK 6:** ... pokračujte na KROK 7. (vždy splněno v případě vodíkových puchýřů)

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 7:** Určete maximální přípustný pracovní tlak (MAWP).

Uvažujte  $t_{sl} = 0$  mm (doplňková tloušťka pro mechanická zatížení jiná než tlak, která způsobují podélné napětí).

Obvodový směr

$$\begin{aligned}MAWP_c &= \frac{S_E \cdot E \cdot t_c}{R + 0,6 \cdot t_c} \\MAWP_c &= \frac{144 \cdot 0,85 \cdot 18}{650 + 0,6 \cdot 18} \\MAWP_c &= 3,334 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Podélný směr

$$\begin{aligned}MAWP_L &= \frac{2 \cdot S_E \cdot E \cdot (t_c - t_{sl})}{R - 0,4 \cdot (t_c - t_{sl})} \\MAWP_L &= \frac{2 \cdot 144 \cdot 0,85 \cdot 18}{650 - 0,4 \cdot 18} \\MAWP_L &= 6,855 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$MAWP = \min(MAWP_c, MAWP_L)$$

$$MAWP = 3,334 \text{ MPa}$$

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

**KROK 8:** Pokud bod definovaný průsečíkem vypočítaných hodnot  $\lambda$  a  $R_t$  leží na nebo nad křivkou, je podélný rozsah vady přijatelný pro provoz při MAWP určeném v KROKU 7.

**Pokud vada není přijatelná,** určete RSF (Remaining Strength Factor) pomocí následující rovnice, kde pro  $\lambda = 1,008$  platí  $M_t = 1,199$ .

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t} \cdot (1 - R_t)}$$
$$RSF = \frac{0,444}{1 - \frac{1}{1,199} \cdot (1 - 0,444)}$$
$$RSF = 0,8279$$



# KAPITOLA 5, LEVEL 1

Doporučená hodnota pro povolený zbývající faktor pevnosti (allowable Remaining Strength Factor) je  $RSF_a = 0,9$ .

- Pokud  $RSF \geq RSF_a$ , pak je oblast lokálního úbytku materiálu přijatelná pro provoz při  $MAWP$  určeném v KROKU 7.
- Pokud  $RSF < RSF_a$ , pak je oblast lokálního úbytku materiálu přijatelná pro provoz při  $MAWP_r$ , kde  $MAWP_r$  se vypočítá pomocí rovnic na dalším slidu.

$$RSF \geq RSF_a$$
$$0,8279 \geq 0,9$$

Neplatí, musí se tedy spočítat redukovaný maximální přípustný tlak.

$$MAWP_r = MAWP \cdot \frac{RSF}{RSF_a}$$

$$MAWP_r = 3,334 \cdot \frac{0,8279}{0,9}$$

$$MAWP_r = 3,070 \text{ MPa}$$

**KROK 9:** Hodnocení je dokončeno pro všechny typy komponent kromě válcových skořepin, kuželových skořepin a kolen. Pokud je komponenta válcová skořepina, kuželová skořepina nebo koleno, vyhodnoťte obvodový rozsah vady.

# KAPITOLA 5, LEVEL 1

- Pokud je následující podmínka splněna, je obvodový rozsah vady přijatelný a žádné další hodnocení není potřeba. Jinak pokračujte dál.

$$c \leq 2 \cdot s \cdot \frac{E_L}{E_C}$$

$$56 \leq 2 \cdot 120 \cdot \frac{0,85}{0,85}$$

platí

- Tím je ukončen KROK 9.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

**KROK 10:** Pokud vzdálenost mezi okrajem puchýře a nejbližším svarovým spojem splňuje následující rovnici, pokračujte ke KROKU 12; jinak pokračujte ke KROKU 11.

$$L_w > \max(2 \cdot t_c, 25 \text{ mm})$$

$$278,5 > \max(2 \cdot 18, 25 \text{ mm})$$

platí

**KROK 12:** Hodnocení úrovně 2 je dokončeno, zařízení může být vráceno do provozu.

# VÝPOČET NA ÚROVNI LEVEL 2

Výsledkem hodnocení na úrovni Level 2 je, že **zařízení může být vráceno do provozu za maximálního přípustného tlaku 3,07 MPa.**



**Anežka Michálková**

Anezka.Michalkova@vutbr.cz

**Tomáš Létal**

letal@fme.vutbr.cz

[www.upi.fme.vutbr.cz](http://www.upi.fme.vutbr.cz)

VÝSTUP BYL VYTVOŘEN V RÁMCI PROJEKTU „AKCELERACE ZELENÝCH DOVEDNOSTÍ A UDRŽITELNOSTI NA VUT V BRNĚ“ S REGISTRAČNÍM ČÍSLEM NPO\_VUT\_MSMT-2143/2024-5



TOTO DÍLO JE LICENCOVÁNO POD LICENCÍ CREATIVE COMMONS BY-NC-SA 4.0.  
LICENČNÍ PODMÍNKY NAVŠTIVTE NA ADRESE  
[HTTPS://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-NC-SA/4.0/LEGALCODE.CS](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.cs)



GREEN, Don W. a Marylee Z. SOUTHARD, ed. *Perry's chemical engineers' handbook*. Ninth edition, 85th anniversary edition. New York: McGraw Hill Education, 2019. ISBN 978-0-07-183409-4.

ČSN EN IEC 60079-10-1 ED.3 *Výbušné atmosféry - Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů - Výbušné plynné atmosféry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2021.

*Hydrogen Flames | H2tools | Hydrogen Tools* [online]. [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/laboratory-safety/laboratory-operations/hydrogen-hazards/hydrogen-flames>

*Fukushima Daiichi Accident - World Nuclear Association* [online]. [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident>

*Processed video sheds light on black smoke at Fukushima Daiichi* [online]. 2021 [vid. 2025-10-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PDKgKNP6c1U>

CHLUMECKÁ, Karolína. Z plynu na vodík. Vídeň hledá cestu z energetické krize modernizací paroplynové elektrárny. *Ekonews* [online]. 1. září 2022 [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://www.ekonews.cz/z-plynu-na-vodik-viden-hleda-cestu-z-energeticke-krize-modernizaci-paroplynove-elektrarny/>

*Donaustadt hydrogen trial* [online]. [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/stories/donaustadt-hydrogen-trial.html>

Hydrogen is vital to tackling climate change. *HyDeploy* [online]. [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://hydeploy.co.uk/>

*DVGW e.V.: G 201902 H2-20* [online]. [vid. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2-20>

SHIVA KUMAR, S. a Hankwon LIM. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**, 13793–13813. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2022.10.127

AJANOVIC, A., M. SAYER a R. HAAS. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2022, **47**(57), 24136–24154. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.02.094

NATIONAL GRID GROUP. *The hydrogen colour spectrum* [online]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>

TICHÝ, Pavel. Základní informace k vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [vid. 2024-07-08]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>

MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČESKÉ REPUBLIKY. *Vodíková strategie České republiky* [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2024/7/Vodikova-strategie-CR-aktualizace-2024.pdf>

YU, Minli, Ke WANG a Harrie VREDENBURG. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, **46**(41), 21261–21273. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.04.016

HOWARTH, Robert W. a Mark Z. JACOBSON. How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering* [online]. 2021, **9**(10), 1676–1687. ISSN 2050-0505, 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.956

*EPRG Hydrogen Pipelines Integrity Management and Repurposing Guideline White Paper* [online]. B.m.: European Pipeline Research Group. 12. červen 2023 [vid. 2024-03-07]. Dostupné z: [https://eprg.net/fileadmin/EPRG\\_Dokumente/EPRG\\_Hydrogen\\_Pipelines\\_Integrity\\_Management\\_and\\_Repurposing\\_Guideline.pdf](https://eprg.net/fileadmin/EPRG_Dokumente/EPRG_Hydrogen_Pipelines_Integrity_Management_and_Repurposing_Guideline.pdf). Rev. 2

*ASME B31.12 – Hydrogen Piping and Pipelines*. New York: The American Society of Mechanical Engineers. 2019

SGL CARBON S.R.O. *Long-term safe sealing of hydrogen with SIGRAFLEX®* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.sglcarbon.com/pdf/SGL-Technical-Info-SIGRAFLEX-Hydrogen-EN.pdf>

*HODNOCENÍ PEVNOSTI ZAŘÍZENÍ A POTRUBÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER Sekce III*. B.m.: NTD A.S.I. 2023.

ČSN EN 13555 *Příruby a přírubové spoje - Parametry těsnění a postupy zkoušení vztahující se k pravidlům pro navrhování přírubových spojů s kruhovými přírubami a těsněním*. Praha: Česká agentura pro standardizaci. 2021.

*Sigraflex Economy V20010C4* [online]. Dostupné z: <https://gasketdata.org/en/SGL-Carbon-GmbH/Sigraflex-Economy-V20010C4/detail/305/>

BARTHELEMY, H., M. WEBER a F. BARBIER. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(11), Special issue on The 6th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2015), 19-21 October 2015, Yokohama, Japan, 7254–7262. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.178

AIR, Alexander, Ebrahim OROMIEHIE a B. Gangadhara PRUSTY. Optimisation of a composite pressure vessel dome using non-geodesic tow paths and automated fibre placement manufacturing. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2025, **288**, 111906. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2024.111906

VERFONDERN, Karl. Hydrogen fundamentals. In: *Hydrogen Safety for Energy Applications* [online]. B.m.: Elsevier, 2022 [vid. 2025-10-09], s. 1–23. ISBN 978-0-12-820492-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-820492-4.00001-4

TARKOWSKI, Radoslaw. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **105**, 86–94. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.01.051

ČSN EN ISO 8044 *Koroze kovů a slitin - Slovník*. B.m.: Česká agentura pro standardizaci. 2020.

KLÁRA KUCHŤÁKOVÁ, DARYA RUDOMILOVA, VÁCLAV ŠEFL, a TOMÁŠ PROŠEK. Nebezpečí křehkého poškození ocelí v prostředí směsi zemního plynu a vodíku. *Český plynárenský svaz*. 2023.

POPOV, Branko N., Jong-Won LEE a Milos B. DJUKIC. Hydrogen Permeation and Hydrogen-Induced Cracking. In: *Handbook of Environmental Degradation of Materials* [online]. B.m.: Elsevier, 2018 [vid. 2023-07-17], s. 133–162. ISBN 978-0-323-52472-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-52472-8.00007-1

*ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Materials, Part D Properties (Metric)*. New York: The American Society of Mechanical Engineers. 2023.

PTÁČEK, LUDĚK; CIHLÁŘ, JAROSLAV; DORAZIL, EDUARD; FORET, RUDOLF; PACAL, BOHUMIL ET AL. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.

CHENG, Y. Frank. *Stress corrosion cracking of pipelines*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-02267-2.

*API 579-1 Fitness For Service*. Washington, D.C.: The American Petroleum Institute. 2016.

BHATTACHARYA, Sova, Kannan CHANDRASEKARAN a A.K. LAHIRI. Comprehensive reliability analysis of blistered ‘LPG wash water vessel’ in FCC unit – Part I: Failure analysis. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, **32**, 91–97. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2013.02.027

TIEGEL, Marie C., May L. MARTIN, Annegret K. LEHMBERG, Martin DEUTGES, Christine BORCHERS a Reiner KIRCHHEIM. Crack and blister initiation and growth in purified iron due to hydrogen loading. *Acta Materialia* [online]. 2016, **115**, 24–34. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.05.034

USTOLIN, Federico, Nicola PALTRINIERI a Filippo BERTO. Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(43), 23809–23840. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2020.06.021

LAUREYS, A., J. VAN STAPPEN, T. DEPOVER, V. CNUUDE a K. VERBEKEN. Electrochemical hydrogen charging to simulate hydrogen flaking in pressure vessel steels. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2019, **217**, 106546. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2019.106546

1.6759 | G18NiMoCr3-6 fisheye, hydrogen embrittlement. *Schmitz-Metallographie GmbH* [online]. 5. červen 2022 [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://www.schmitz-metallographie.de/en/gefuge/1-6759-g18nimocr3-6-fisheye-hydrogen-embrittlement/>

*API RECOMMENDED PRACTICE 941: Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants*. B.m.: API. 2016.

*Tesoro Anacortes Refinery Fatal Explosion and Fire* | CSB [online]. [vid. 2025-10-09]. Dostupné z: <https://www.csb.gov/tesoro-anacortes-refinery-fatal-explosion-and-fire/>