



Projekt HENRI

Workshop SPNZ PLYNLAB 2026

Roman Zavada





**Zadanie
projektu**



nafta



Vytvorenie metodológie pre hodnotenie ložísk pre skladovanie H₂



Identifikácia vhodných štruktúr pre skladovanie H₂ v SR



Určenie maximálnej koncentrácie H₂ pre skladovanie a určenie ceny skladovania



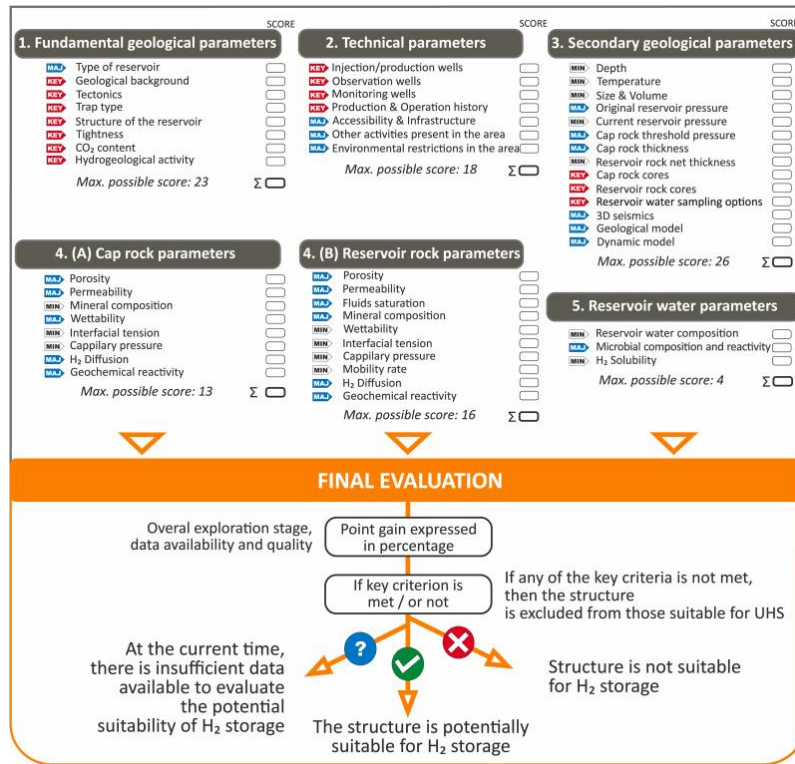
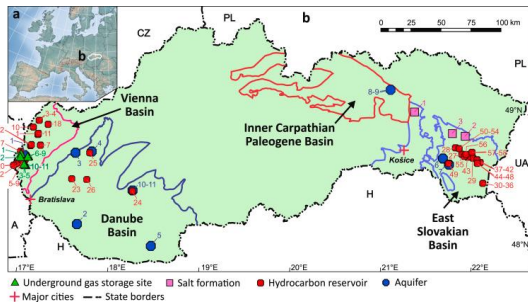
Pilotná technológia pre overenie v skladovania na vytipovaných štruktúrach

I. fáza



WP1.1 Metodika a skrining štruktúr

- Spracovaná metodika pre posúdenie vyťažovaných štruktúr a solných štruktúr
- Spracovaný skrining štruktúr na SR
- Vybrané ložiská pre ďalšie pokračovanie projektu
- Získaný užitkový vzor
- Odborná publikácia zverejnená: [https://authors.elsevier.com/sd/article/S0360-3199\(26\)01134-1](https://authors.elsevier.com/sd/article/S0360-3199(26)01134-1)



Parameters identified for site screening: **KEY** – key, **MAJ** – major, and **MIN** – minor criteria.



WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na ložiskovú horninu a cement

Testovanie ložiskovej horniny a cementu



- **Scope:**

- Laboratory Investigations: Alteration of reservoir rock

Reservoir	Pressure [bar]	Temperature [°C]	Salinity [mg/l]
1	80	40	19 000
2	160	90	16 000
3	200	60	24 000

- different H₂ concentration (50% of H₂, 100% H₂)

- **Investigations:**

- Permeability measurements (water and gas)
 - Petrographical characterization (Thin section analysis)
 - Storage experiments in specific pressure vessel
 - » Total for 12 months (Sampling after 6 and 12 months)

Storage in 50 % hydrogen in natural gas

Reservoir	Core	before [mD]	after [mD]
R1	R1-P11	3,2	2,81
R1	R1-P12	4,9	2,75
R2	R2-P06	64,7	126
R2	R2-P07	75,1	168
R3	R3-P01	0,032	-
R3	R3-P02	0,116	-



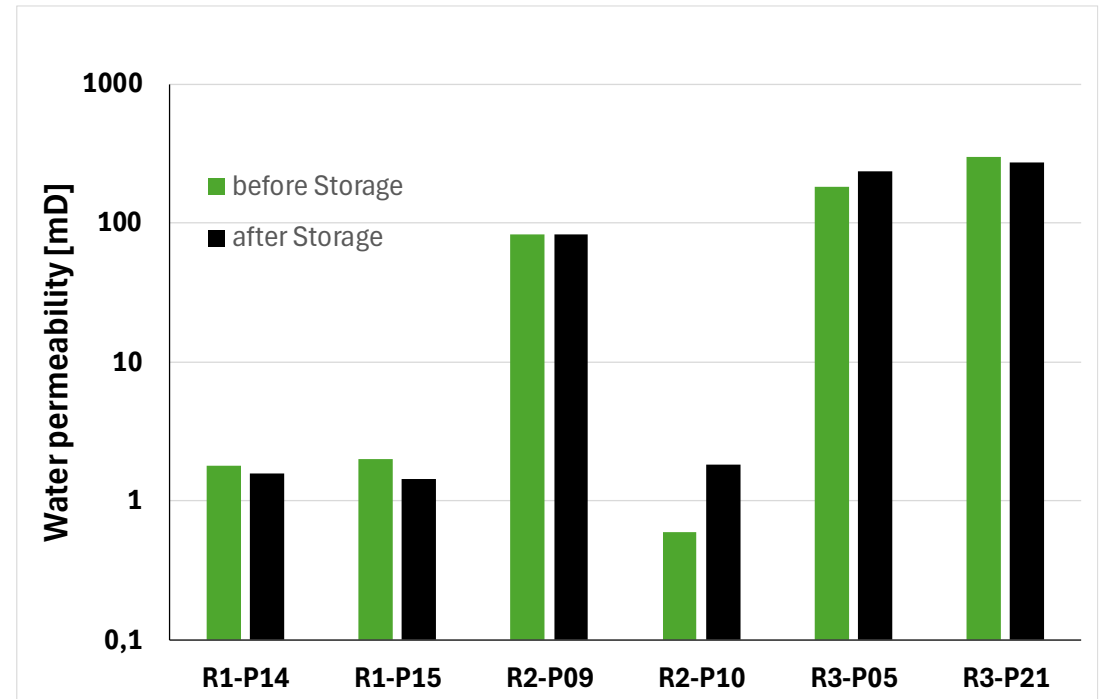
WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na ložiskovú horninu a cement

Testovanie ložiskovej horniny a cementu



Storage in 100 % hydrogen

Reservoir	Core	before [mD]	after [mD]
R1	R1-P14	1,8	1,58
R1	R1-P15	2,0	1,43
R2	R2-P09	82,5	83,4
R2	R2-P10	0,6	1,84
R3	R3-P05	181	235
R3	R3-P21	301	272





WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na ložiskovú horninu a cement

Ložisková hornina

- Zmeny priepustnosti v rámci tolerovateľného rozsahu
- Žiadny vplyv na skladovacích podmienok (teplota, tlak)
- Nepozorované zmeny mineralogického zloženia ani štrukturálne zmeny
- Žiaden významný rozdiel medzi 100% H₂ a 50% H₂+ZP
- **Na základe testovacích podmienok neidentifikovaný žiadny vplyv na integritu zásobníka**

Cement

- Mierne rozdiely v priepustnosti na niektorých vzorkách pred a po. Zmeny nevýznamné
- Zmeny farieb na kontaktných plochách. Reakčné rozhrania boli pozorované na vzorkách skladovaných v 50 % H₂/NG bez ohľadu na podmienky skladovania (teplota, tlak a salinita). Výraznejšie na kontaktnom povrchu cement-plynná fáza, menej výrazné na rozhraní cement-ložisková voda.
- Na vzorkách skladovaných v čistom vodíku neboli pozorované žiadne reakčné rozhrania
- XRD na kontaktných povrchoch s plynom a ložiskovou vodou vykazuje len malé rozdiely.
- **Za testovaných podmienok nebol zistený žiadny vplyv H₂ na integritu cementu.**





WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na tesniacu vrstvu

Brine permeability initial sample:

- Hydrogen (100%)	1.66 E-21 m ²
- Methane (100%)	1.44 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (2%)	1.24 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (20%)	1.31 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (50%)	1.26 E-21 m ²
- Hydrogen (100%)	1.27 E-21 m ²
- Final measurement	1.30 E-21 m ²

Brine permeability hydrogen stored:

- Initial measurement	1.48 E-21 m ²
- Hydrogen (100%)	1.31 E-21 m ²
- Methane (100%)	1.32 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (2%)	1.25 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (20%)	1.25 E-21 m ²
- Methane + Hydrogen (50%)	1.20 E-21 m ²
- Hydrogen (100%)	1.14 E-21 m ²
- Final measurement	1.26 E-21 m ²





WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na tesniacu vrstvu

Výsledky

▪ Kapilárny vytesňovací tlak

Capillary threshold pressure after hydrogen exposure (dynamic injection method):

- Hydrogen (100%)	6.7 MPa
- Methane (100%)	7.4 MPa
- Methane + Hydrogen (2%)	7.4 MPa
- Methane + Hydrogen (20%)	7.1 MPa
- Methane + Hydrogen (50%)	6.5 MPa
- Hydrogen (100%)	7.3 MPa

- Kapilárny vytesňovací tlak nie je ovplyvnený použitými plynmi t.j. H₂ a ZP. Resp. ich zmesami
- **Výsledky všetkých testov nepreukázali žiadne výrazné rozdiely medzi rôznymi podmienkami**
- **Tesniaca vrstva je rovnako tesná ako pre ZP tak aj pre zmesy plynu a vodíka resp. vodíka**



WP1.2 – Laboratórny výskum vplyvu vodíka na mikrobiálne reakcie

- Testované 3 objekty



Objekt 1

- Pozorovaná metanizácia i aktivita sulfat redukujúcich baktérii aj produkcia acetátu
- Spotreba H₂ pri simulácii reálnych podmienok 0,34 – 1,30 mmol H₂/d*L
- Dominantné metanotrofné baktérie

Objekt 2

- Pozorovaná metanizácia i aktivita sulfat redukujúcich baktérii aj produkcia acetátu
- Spotreba H₂ pri simulácii reálnych podmienok do 1,182 mmol H₂/d*L
- Dominantné metanotrofné baktérie

Objekt 3

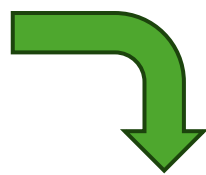
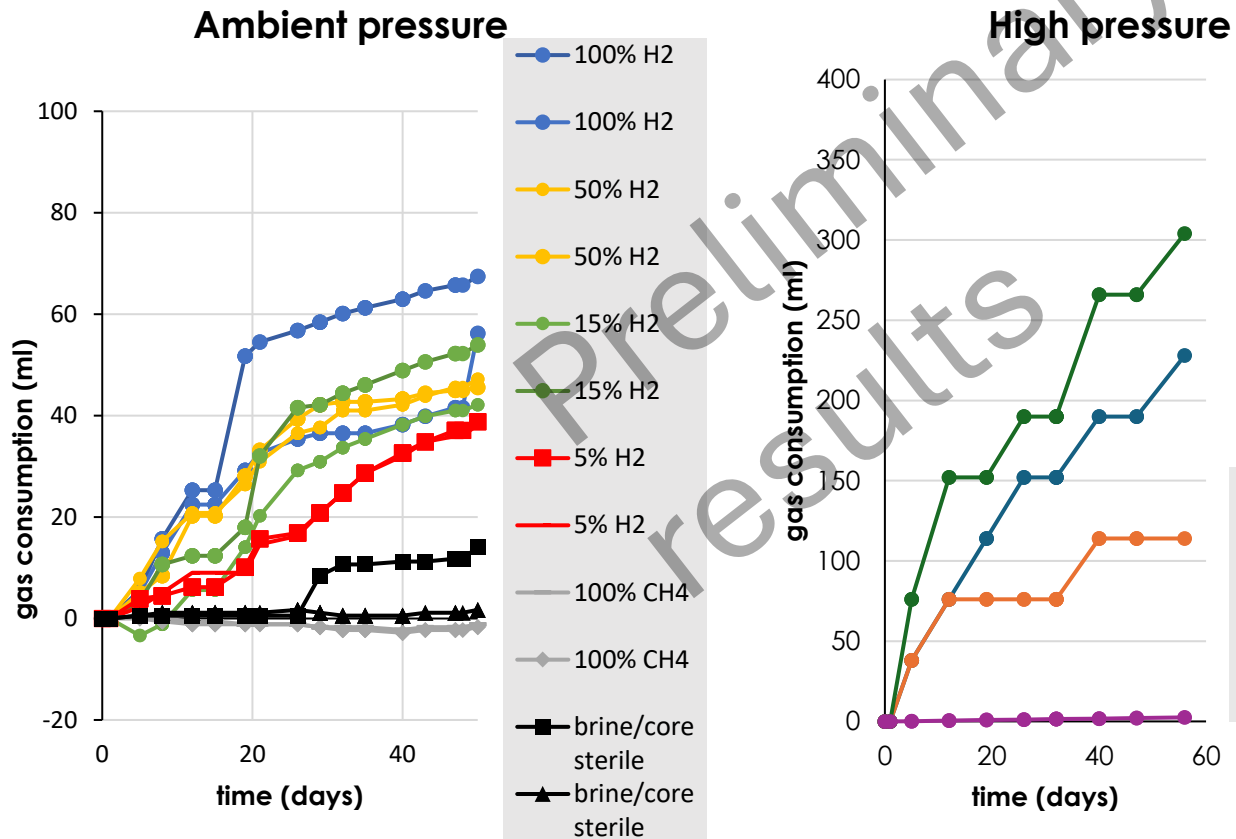
- Baktérie síce prítomné v ložiskovej vode, avšak neboli aktívne
- Pri atmosferickom tlaku neprebíhala žiadna reakcia
- Pri vysokom tlaku, metanotrofné baktérie boli detekované ale opäť neboli aktívne
- Ložisko vyzerá byť mikrobiálne neaktívne z pohľadu H₂

Table 17: Overview of microbiological activities in reservoirs 1, 2 and 3 at different hydrogen stimulation

Reservoir	Biochemical process	100 % H ₂	50 % H ₂	15 % H ₂	5 % H ₂	100 % CH ₄	control	15 % H ₂	100 % H ₂
		Ambient pressure					high pressure		
1	Sulfate reduction	+	+	+	+/-	+/-	-	+/-	+
1	Methanogenesis	+	+/-	+	-	-	-	+	+
1	Acetogenesis	+	+	+/-	-	-	-	+	+
2	Sulfate reduction	+	+	+	+	+/-	-	+/-	+/-
2	Methanogenesis	+	+/-	+	+/-	-	-	-	+
2	Acetogenesis	-	-	-	-	-	-	+	+
3	Sulfate reduction	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Methanogenesis	-	-	-	-	-	-	-	+
3	Acetogenesis	-	-	-	-	-	-	-	-



Spotreba plynu pri tlaku okolia a vysokom tlaku



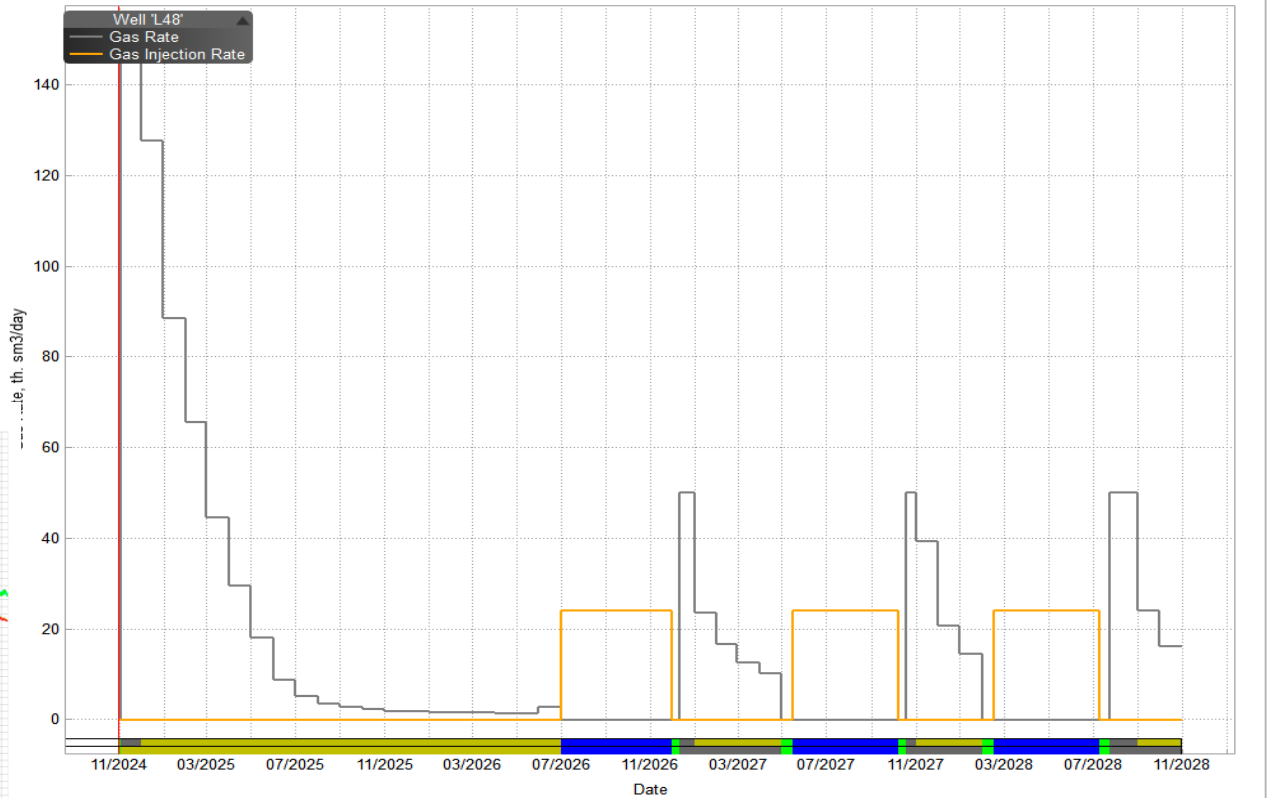
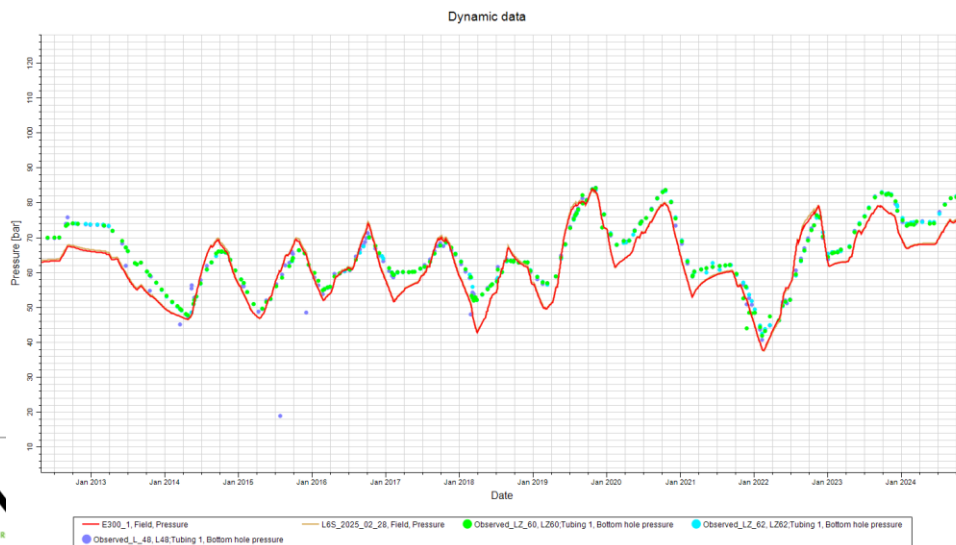
Reservoir microorganisms consume gas under ambient and high pressure at all tested hydrogen concentrations

Gas consumption rate was influenced by hydrogen concentration and pressure



WP1.3 – Modelovanie správania H2 v zmesi so zemným plynom v ložisku

- Geologický model spracovaný, potrebné dodatočné korekcie
- Prvé krivky dynamického modelu, ako by vyzerala ťažba





WP1.3 – Modelovanie správania H2 v zmesi so zemným plynom v ložisku

No. of Cycle	Eclipse 300			CMG-GEM		
	Injection Pressure (bar)	Production Pressure (bar)	Recovery Factor (%)	Injection Pressure (bar)	Production Pressure (bar)	Recovery Factor (%)
1	60.1	49.4	80	56.1	45.9	78.55
2	61.1	49.9	86	59.7	48.3	85.3
3	61.3	50	90	61.3	49.2	88.55
Total			85			84.14



Zistenia modelovanie:

- Prepojenie geochémie a mikrobiálnych reakcií vedie k miernemu poklesu faktora výťažnosti vodíka.
- Voda je vedľajším produktom všetkých troch mikrobiálnych reakcií, čo má za následok postupný nárast počtu vodných molov v blízkosti vrtu v priebehu času
- Čistota vodíka sa v priebehu po sebe nasledujúcich cyklov zlepšuje, ale tri cykly nestačia na dosiahnutie vysokej výťažnosti vodíka.
- Simulačné problémy vyplývajú zo prepojenia rozpustnosti, geochémie, mikrobiálnych reakcií a statického modelu, čo môže viesť k nestabilite simulácie.



WP1.4 – Vplyv vodíka na podzemný zásobník a jeho infraštruktúru

Výsledky testovania materiálov – testovanie materiálov



- Zadanie – testovanie mechanických vlastnosti a mikroštruktúr

Material	Tensile test	Hardness testing	Metallographic investigation	CLT + TDS	SEM investigation	Autoclave tests without load + TDS	SSRT + HEI
12022.1 – BM Matl. 4	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4 + 1
11416.1 - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4 + 1
13030 - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
12021.1 – BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
12021.1 - WM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
12022.1 – BM Matl. 8	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4 + 1
12022.1 – WM Matl. 8	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4 + 1
L485ME - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4 + 1
11503.1 - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
11503.1 - WM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
11523.1 - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		
13126.1 - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4
L415NB - BM	2	1	1	4 + 1	If a fracture occurs		4
L415NB - WM	2	1	1	4	If a fracture occurs		4
SS - Spiral wound gasket						4 + 1	
Metal ring RTJ						4 + 1	
Al sealing						4 + 1	
Total tests	28	14	14	69		15	37

Vysvetlenie

- Tensile test – skúška ťahom
- Hardness test – skúška tvrdosti
- Metallographic investigations- metalografické skúmanie
- CLT – skúška pri konštantom zaťažení
- TDS – test pri cyklickom zaťažení
- SEM – skúmanie pomocou skenovacieho elekt. Mikroskopu
- Autoklávové testy bez zaťaženia
- SSRT – slow strain rate test – skúška pomalým natiahnutím materiálu v korozívnom prostredí
- HEI – index krehkosti spôsobenej vodíkom



WP1.4 – Vplyv vodíka na podzemný zásobník a jeho infraštruktúru

Výsledky testovania materiálov – testovanie materiálov



Material	CLT + TDS	Autoclave tests without load + TDS	Stress	Gas	Electrolyte	Rupture [yes/no]	H content after test [wt.-%ppm]
12022.1 – BM Matl. 4	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.34 – 0.35 – 0.33
11416.1 - BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.38 – 0.37 – 0.60
13030 - BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 40 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.24 – 0.23 – 0.34
12021.1 – BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 40 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.22 – 0.31 – 0.35
12021.1 - WM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 40 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.50 – 0.37 – 1.49
12022.1 – BM Matl. 8	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.36 – 0.59 – 0.40
12022.1 – WM Matl. 8	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.28 – 0.34 – 0.31
L485ME - BM	4 + 1		110% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 80 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.29 – 0.43 – 0.72
11503.1 - BM	4 + 1		105% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 80 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.29 – 0.45 – 0.35
11503.1 - WM	4 + 1		105% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 80 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.27 – 0.71 – 0.42
11523.1 - BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.31 – 0.43 – 0.38
13126.1 - BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 250 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.34 – 0.54 – 0.27
L415NB - BM	4 + 1		120% YS	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	No	0.28 – 0.91 – 0.38
L415NB - WM	4		120% YS	Ar – H ₂ , p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂	No	0.99 – 1.52
SS - Spiral wound gasket		4 + 1	-	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	-	2.62 – 3.45 – 2.69
Metal ring RTJ		4 + 1	-	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 250 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	-	0.10 – 0.55 – 0.49
Al sealing		4 + 1	-	Ar – H ₂ – H ₂ +1% H ₂ S, p _{total} = 100 bar	Formation water for H ₂ and H ₂ +1% H ₂ S	-	0.30 – 0.55 – 0.66
Total tests	69	15					

nafta



WP1.4 – Vplyv vodíka na podzemný zásobník a jeho infraštruktúru

Výsledky testovania materiálov – **testovanie materiálov**



Zistenia

- Základné materiály spĺňajú štandardizované požiadavky na mechanické vlastnosti. **Niektoré zvary** obsahujú **vážne chyby** a **majú nižšiu úroveň pevnosti** v porovnaní so **základným materiálom**
- **Zvar** materiálu **L415-WM (1 vzorka)**, kritické výsledky v oblasti krehnutia, v skúške s konštantným zaťažением materiál bol vyhovujúci, ale v **fahovej skúške** s pomalou deformáciou sa potvrdila **výrazná** náchylnosť na vodíkové krehnutie
- Všetky ostatné materiály vykázali v skúške s konštantným zaťažением nižší obsah vodíka než kritická hodnota, **a teda nenaplnili** podmienky pre iniciáciu vodíkoveho krehnutia
- **Lomová huževnatosť (ASME1820)**
 - všetky materiály testované v rámci projektu dosiahli hodnotu $KJ0.2$ vyššiu ako $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, čo je bežne používaná minimálna požiadavka pre použitie ocele v prostredí vodíka.
 - Zváraný materiál 13030-WM dosiahol hodnotu $KJ \approx 57 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, teda je hraničný a neodporúča sa na použitie v prostredí vodíka bez dodatočných testov a opakovaní skúšok.
 - Novšie prístupy v priemysle naznačujú, že parameter $KJ0.05$ (pri posune trhliny 0,05 mm) je vhodnejší pre hodnotenie materiálov v prostredí vodíka, keďže je menej závislý od skúšobných podmienok (najmä rýchlosti zaťažovania). Podľa hodnotenia pomocou $KJ0.05$ sú ako nevyhovujúce identifikované tieto materiály: 12022.1, 13030-WM
 - Bolo zaznamenané výrazné zníženie lomovej huževnatosti v prostredí vodíka v porovnaní s ovzduším, často len na 20–50 % pôvodnej hodnoty v ovzduší, najmä pri zvarových kovochoch.
 - Samotná hranica $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ nie je dostatočná na univerzálne hodnotenie bezpečnosti materiálu v prostredí vodíka



WP1.4 – Vplyv vodíka na podzemný zásobník a jeho infraštruktúru

Výsledky testovania materiálov – **testovanie materiálov**



Výsledky – ASTM F1624

- Skúšky boli vykonané podľa ASTM F1624, s modifikáciou, pri ktorej je zaťaženie riadené silou, nie deformáciou
- Na lome skúšobných telies bolo pozorované, že stabilné šírenie trhliny sa takmer nevyskytovalo; vo väčšine prípadov došlo k náhlemu, krehkému porušeniu. V niektorých prípadoch nastalo náhle porušenie až po celkovej plastickej deformácii vzorky. Z uvedených dôvodov je potrebné interpretovať výsledky týchto skúšok s opatrnosťou
- Na základe predchádzajúcich skúseností Institut de la Corrosion je známe, že inkrementálne krokové zaťažovanie použité v tomto projekte je konzervatívnejšie než skúšky podľa ASTM E1820.
- Výsledky tak môžu predstavovať horší (prísnejší) scenár správania materiálu v porovnaní so štandardným hodnotením lomovej húževnatosti.
- Na základe údajov uvedených v tabuľke 4 sa javí, že materiál 11416 je z hľadiska tejto metodiky nevyhovujúci.



Zhrnutie



Skladovanie 100% H₂ v testovaných štruktúrach je principiálne možné na základe dát získaných z meraní a z aproximácií

- Potvrdenie na základe testov ložiskovej horniny
- Cap rocku
- Mikrobiológie
- Pri skladovaní H₂ **môže dôjsť k mikrobiálnej produkcii H₂S**
 - Potrebne verifikovať fyzickým testovaním a sledovaním
- Počas ťažby bude kvalita H₂ klesať – v rámci II. Fázy projektu – testovanie technológie na separovanie H₂ na požadovanú kvalitu (98% obj.)
- Z pohľadu testovania materiálov bude kľúčové mať jednotnú metodiku pre posudzovanie materiálov na vhodnosť pre vodík – v súčasnosti neexistuje jednoznačný štandard

**Ďakujeme
za pozornosť**

