CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

DOPRAVA PRO BUDOUCNOST

# Metodika kontroly kvality vodíkového paliva pro vozidla s palivovým článkem typu PEM

Adéla **Svejkovská**, Vojtěch **Příkryl**, Bronislav **Vahalík**,
Roman **Smutný**, Roman **Ličbinský**, Michal **Neuschl**, Petr **Polanský**

**XII. česko-slovenská konference**
Doprava, zdraví a životní prostředí

22.–23. 9. 2026



# Publicita a spolufinancování projektu

## Spolufinancování TA ČR

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národního centra kompetence.

T A
Č R

Program **Národní centra kompetence**

DOPRAVA PRO BUDOUCNOST

## Dílčí projekt DP004

Tato prezentace je založena na výsledcích dosažených v rámci dílčího projektu:

**DP004: Nástroje a znalostní systém pro inkubaci vodíkových technologií**

**Součást: Národní centrum vodíkové mobility (NAHYC-m)**

## Struktura prezentace

- Potřeba kontroly kvality vodíku
- Normativní a kontrolní prostředí v České republice
- Cíl metodiky
- Metodický postup
- Praktický příklad aplikace
- Přínosy metodiky

DOPRAVA PRO BUDOUCNOST

CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

# Proč je kvalita vodíku kritická?

- Palivové články jsou velmi citlivé i na stopová množství kontaminantů
- Kontaminace může způsobit:
  - pokles výkonu,
  - snížení účinnosti,
  - zkrácení životnosti,
  - nevratnou degradaci článku



# Normativní a kontrolní prostředí v České republice

## Specifikace kvality vodíku
podle ČSN ISO 14687

| Parametr / kontaminant | Limitní hodnota |
|---|---|
| Index vodíku (minimální molární podíl) | 99,97 % |
| Celkové nevodíkové plyny (max.) | 300 µmol/mol |
| Voda ($H_2O$) | 5 µmol/mol |
| Celkové uhlovodíky bez metanu (C1 ekvivalent) | 2 µmol/mol |
| Metan ($CH_4$) | 100 µmol/mol |
| Kyslík ($O_2$) | 5 µmol/mol |
| Helium (He) | 300 µmol/mol |
| Dusík ($N_2$) | 300 µmol/mol |
| Argon (Ar) | 300 µmol/mol |
| Oxid uhelnatý (CO) | 2 µmol/mol |
| Oxid uhličitý ($CO_2$) | 0,2 µmol/mol |
| Celkové sloučeniny síry (S ekvivalent) | 0,004 µmol/mol |
| Formaldehyd (HCHO) | 0,2 µmol/mol |
| Kyselina mravenčí (HCOOH) | 0,2 µmol/mol |
| Amoniak ($NH_3$) | 0,1 µmol/mol |
| Halogenované sloučeniny (ekvivalent halogenidů) | 0,05 µmol/mol |
| Maximální koncentrace pevných částic | 1 mg/kg |

## Přehled sledovaných kontaminantů
podle vyhlášky č. 516/2020 Sb.

| Parametr |
|---|
| Obsah vody |
| Obsah uhlovodíků |
| Obsah kyslíku |
| Obsah síry |
| Obsah formaldehydu |
| Obsah kyseliny mravenčí |
| Obsah amoniaku |
| Maximální koncentrace pevných částic |

**Současný stav:** fixní seznam kontaminantů

**Problém:** neodráží konkrétní podobu dodavatelských řetězců

**Potřeba:** zaměřit kontroly na skutečná rizika

# Cíl metodiky

DOPRAVA PRO BUDOUCNOST

**Vyvinout metodiku pro efektivní kontrolu kvality vodíku,**
která zohledňuje reálná rizika v celém dodavatelském řetězci.

$H_2$

**1** $H_2$
**Hodnocení kvality vodíku**
v celém dodavatelském řetězci

→

**2**
**Identifikace zdrojů kontaminace**
relevantní zdroje kontaminace

→

**3**
**Vyhodnocení rizika kontaminantů**
pravděpodobnost x dopad
P × D

→

**4**
**Optimalizace analytických kontrol**
cílený rozsah kontrol
→ úspora financí

**Výstup metodiky**

## Cílená kontrola
**zaměřená na skutečná rizika**

- Úspora financí
- Vyšší efektivita kontrol

# Postup aplikace metodiky

## 1 Identifikace dodavatelského řetězce




- Definice technologických uzlů řetězce
- Určení konkrétních technologických variant

## 2 Identifikace potenciálních kontaminantů



- Výběr registrů pro jednotlivé uzly
- Doplnění univerzálních kontaminantů
- **Souhrnný seznam kontaminantů**

## 3 Stanovení rizika kontaminantů

| Pravděpodobnost výskytu | Dopad na palivový článek |
|---|---|
| • časté | • velmi vysoká |
| • možné | • vysoká |
| • vzácné | • střední |
| • velmi vzácné | • nízká |

P × D

## 4 Posouzení kumulativního rizika



- Zohlednění výskytu v celém řetězci
- Bodové hodnocení a kumulativní index

## 5 Aplikace rozhodovací matice



- Kombinace výsledné pravděpodobnosti a dopadu
- Stanovení doporučení:
  - **testovat**
  - **netestovat**

**VÝSTUP**

**Cílený rozsah analytických kontrol**

zaměřený na skutečná rizika kontaminace vodíkového paliva v konkrétním dodavatelském řetězci.

# Krok 1: Identifikace dodavatelského řetězce a specifikace technologických uzlů

## VÝROBA

**Technologické varianty**

- Alkalická elektrolýza
- PEM elektrolýza
- SMR + PSA
- SMR + PSA bioplyn
- POX + PSA
- Elektrolýza solanky
- Krakování amoniaku

## TRANSPORT

**Technologické varianty**

- Nové potrubí
- Upravené potrubí po přepravě zemního plynu
- Trailer

## SKLADOVÁNÍ

**Technologické varianty**

- Stacionární tlakové zásobníky (storage banks)
- Podzemní zásobníky ve směsi s metanem

## UNIVERZÁLNĚ KONTROLOVANÉ KONTAMINANTY

Atmosférické kontaminanty:
**$N_2$, $O_2$, Ar, $H_2O$**
(u $H_2O$ včetně vnosu při údržbě a servisu)

Celkové uhlovodíky bez metanu

Pevné částice

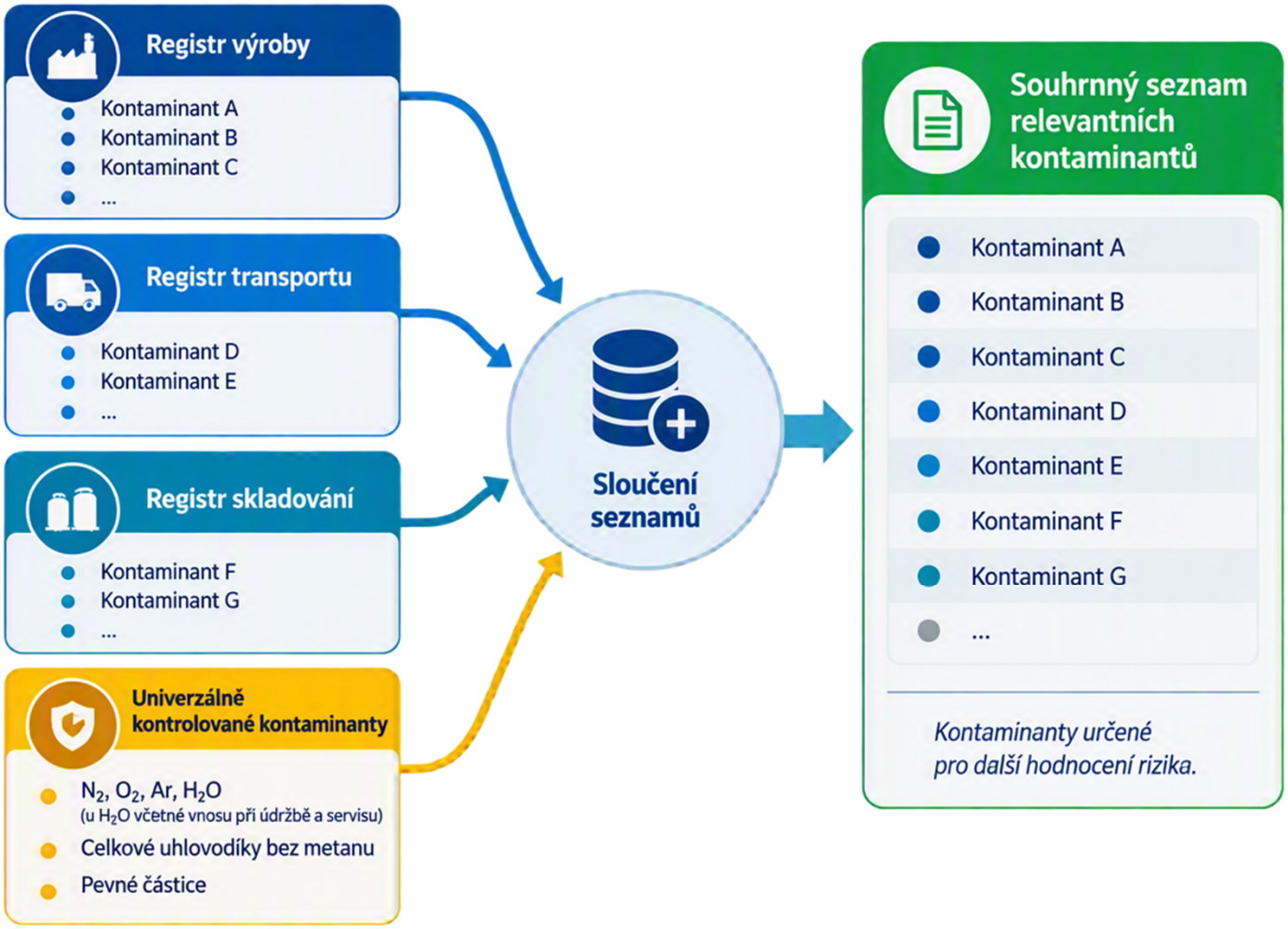
# Krok 2: Identifikace potenciálních kontaminantů

## Klíčové myšlenky

- Pro každý technologický uzel jsou využity příslušné registry kontaminantů.
- Součástí hodnocení jsou také univerzálně kontrolované kontaminanty.
- Registry obsahují kontaminanty specifické pro danou technologii.
- Výsledkem je souhrnný seznam relevantních kontaminantů.

## Výstup

Seznam potenciálních kontaminantů pro daný dodavatelský řetězec.



# Krok 3: Stanovení pravděpodobnosti výskytu a dopadu kontaminantu

## Pravděpodobnost výskytu kontaminantu

| Kategorie | Numerická hodnota |
|---|---|
| Časté | 5 |
| Možné | 3 |
| Vzácné | 2 |
| Velmi vzácné | 1 |

×

## Dopad na PEM palivový článek

| Kategorie | Numerická hodnota |
|---|---|
| Velmi vysoký | 10 |
| Vysoký | 5 |
| Střední | 2 |
| Nízký | 1 |

↓

**Rizikový profil**
jednotlivých kontaminantů

# Krok 4: Posouzení kumulativního rizika

## Klíčové myšlenky

- Hodnotí se opakovaný výskyt stejného kontaminantu v různých částech řetězce.
- Bodové hodnoty pravděpodobnosti se kumulují.
- Kumulace může zvýšit výslednou kategorii pravděpodobnosti.
- Kontaminant může být na základě kumulativního rizika zařazen mezi testované látky.




## Bodové hodnocení

| Pravděpodobnost výskytu kontaminantu | Body |
|---|---|
| N/A (bez identifikovaného zdroje) | 0 |
| Velmi vzácné | 1 |
| Vzácné | 2 |
| Možné | 3 |
| Časté | 5 |

**Výstup** | **Upravená pravděpodobnost výskytu** zohledňující celý dodavatelský řetězec.

# Převod kumulativního indexu na výslednou kategorii pravděpodobnosti

$$I_{kp} = \sum P_i$$

Kumulativní index pravděpodobnosti výskytu je součet bodových hodnot ze všech relevantních fází řetězce.

kde:

- $I_{kp}$ — index kumulativní pravděpodobnosti výskytu kontaminantu
- $P_i$ — bodová hodnota pravděpodobnosti výskytu v technologickém uzlu

## Převodní tabulka

| $I_{kp}$ (body) | Výsledná kategorie |
|---|---|
| 0 | N/A (bez identifikovaného zdroje) |
| 1 | Velmi vzácné |
| 2 | Vzácné |
| 3–4 | Možné |
| ≥ 5 | Časté |

**Výstup**

**Kategorie pravděpodobnosti** vstupující do rozhodovací matice.

# Krok 5: Aplikace rozhodovací matice

## Princip

- Do rozhodovací matice vstupuje výsledná pravděpodobnost výskytu a dopad kontaminantu.
- Kombinace obou parametrů určuje potřebu kontroly.
- Výsledkem je doporučení pro další postup.

## Vstupy

Pravděpodobnost výskytu + Dopad kontaminantu

## Rozhodovací matice

| Dopad | Velmi vzácné 1 | Vzácné 2 | Možné 3 | Časté 5 |
|---|---|---|---|---|
| Velmi vysoký 10 | 10 | 20 | 30 | 50 |
| Vysoký 5 | 5 | 10 | 15 | 25 |
| Střední 2 | 2 | 4 | 6 | 10 |
| Nízký 1 | 1 | 2 | 3 | 5 |

Pravděpodobnost

1–4 Nízké riziko – NETESTOVAT

≥5 Vysoké riziko – TESTOVAT

## Výstup

**Rozhodnutí pro další postup:**

1–4 **NETESTOVAT** Nízké riziko

≥5 **TESTOVAT** Vysoké riziko

# Stanovení rozsahu kontroly kvality vodíkového paliva

**Plošná kontrola**
všech kontaminantů

**Rizikově orientovaná kontrola**
relevantních kontaminantů

## Klíčové principy

### Relevantní rizika

Vybírány jsou pouze kontaminanty představující relevantní riziko.

### Specifický řetězec

Rozsah kontroly odpovídá konkrétnímu dodavatelskému řetězci.

### Flexibilní přístup

Metodika umožňuje přejít od plošného k rizikově orientovanému přístupu.

## Výstup

**Finální seznam kontaminantů**
určených k analytické kontrole.

Rozsah kontroly přizpůsobený konkrétnímu dodavatelskému řetězci vodíku.

# Praktický příklad

## Definice dodavatelského řetězce:

### VÝROBA
**SMR + PSA**
Parní reformování zemního plynu

### TRANSPORT
**Upravené potrubí**
po přepravě zemního plynu

### SKLADOVÁNÍ
**Podzemní zásobníky**
ve směsi s metanem

**Univerzálně kontrolované kontaminanty**

## Registr kontaminantů pro zvolenou technologii výroby: SMR + PSA

| Výrobní technologie | Kontaminanty | Zdroj/zdůvodnění | Pravděpodobnost výskytu | Dopad kontaminantu |
|---|---|---|---|---|
| SMR+PSA | $H_2O$ | Vysoký obsah vodní páry v SMR, PSA ji odstraňuje, ale při saturaci může docházet k průniku | 2 – vzácné | 2 – střední |
| | CO | Zdrojem je syngas nebo porucha PSA, PSA adsorbuje dobře, ale průnik je možný | 5 – časté | 5 – vysoký |
| | $CO_2$ | Produkt reakce a následné konverze vodního plynu, PSA jej neodstraní 100% při průniku nebo nasycení lože | 5 – časté | 2 – střední |
| | Ar | Přirozená složka ZP, PSA extrémně špatná adsorpce | 3 – možné | 1 – nízký |
| | $N_2$ | Stopové v ZP, PSA velmi slabá separace | 3 – možné | 1 – nízký |
| | He | Klasická reziduální složka ZP (pokud se v něm nachází), PSA jej prakticky neodstraní | 5 – časté | 1 – nízký |
| | $CH_4$ | Surovina SMR, PSA velmi dobře odstraní, ale stopový průnik je možný | 3 – možné | 1 – nízký |
| | Celkové uhlovodíky bez metanu | Neúplný rozklad vyšších alkanů ze vstupního zemního plynu v SMR reaktoru | 1 – velmi vzácné | 2 – střední |
| | Formaldehyd (HCHO) | Vedlejší produkty reformních nebo konverzních reakcí nebo mohou být vneseny prostřednictvím kyslíkatých organických příměsí ve vstupní surovině | 1 – velmi vzácné | 5 – vysoký |
| | Kyselina mravenčí (HCOOH) | Vedlejší produkty reformních nebo konverzních reakcí nebo mohou být vneseny prostřednictvím kyslíkatých organických příměsí ve vstupní surovině | 1 – velmi vzácné | 5 – vysoký |
| | Celkový obsah sloučenin síry | Nedokonalé odsíření zemního plynu | 2 – vzácné | 10 – velmi vysoký |

# Praktický příklad: Registry dalších částí dodavatelského řetězce

## Transport

Upravené potrubí po přepravé zemního plynu

| Transport | Kontaminanty | Zdroj/zdůvodnění | Pravděpodobnost výskytu | Dopad kontaminantu |
|---|---|---|---|---|
| Upravené potrubí po přepravé zemního plynu | Metan ($CH_4$) | Hlavní složka zemního plynu | 3 – možné | 1 – nízký |
| | Celkové uhlovodíky bez metanu | Alkany alkeny (etylén, propan, propylen, butan aj.) | 3 – možné | 2 – střední |
| | Celkové sloučeniny síry | Merkaptany, $H_2S$, $SO_2$, COS, $CS_2$ | 3 – možné | 10 – velmi vysoký |
| | Pevné částice | Písek (oxid křemičitý), rez a kovové úlomky, potrubní prach | 3 – možné | 10 – velmi vysoký |

## Skladování

Podzemní zásobníky ve směsi s metanem

| Skladování | Kontaminanty | Zdroj/zdůvodnění | Pravděpodobnost výskytu | Dopad kontaminantu |
|---|---|---|---|---|
| Podzemní zásobníky ve směsi s metanem | Voda ($H_2O$) | Geologická voda v porézním prostředí | 3 – možné | 2 – střední |
| | Metan ($CH_4$) | Zbytkový zemní plyn | 3 – možné | 1 – nízký |
| | Celkové sloučeniny síry | Činnost bakterií redukující šírany | 3 – možné | 10 – velmi vysoký |
| | Celkové uhlovodíky bez metanu | Ze zemního plynu | 3 – možné | 2 – střední |

## Univerzálně kontrolované kontaminanty

| Kontaminant | Zdroj/zdůvodnění | Pravděpodobnost výskytu | Dopad kontaminantu |
|---|---|---|---|
| Atmosférické kontaminanty: $N_2$, $O_2$, Ar, $H_2O$ (u $H_2O$ včetně vnosu při údržbě a servisu) | Přepojování traileru, výměna storage bank, proplachování, netěsnosti, kompresor (teplotní cykly), nedokonalé sušení po servise, kondenzace v chladicích částech | $N_2$, $O_2$, $H_2O$ 3 – možné<br>Ar 2 – vzácné | Ar, $N_2$ 1 – nízký<br>$O_2$, $H_2O$ 2 – střední |
| Celkové uhlovodíky bez metanu | Olejové kompresory, maziva ventilů, těsnění, servisní zásahy | 3 – možné | 2 – střední |
| Pevné částice | Koroze, mechanické opotřebení, montážní zbytky | 3 – možní | 10 – velmi vysoký |

# Praktický příklad: Výsledné vyhodnocení kontaminantů

Souhrnná tabulka kumulace pravděpodobnosti výskytu kontaminantů a jejich vyhodnocení v rozhodovací matici.

| Kontaminant | Výroba | Transport | Skladování | Univerzální kontaminace | $I_{kp}$ | Výsledná pravděpodobnost vstupující do matice | Dopad kontaminantu | Výsledek |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$H_2O$** | 5 | 0 | 0 | 3 | 8 | 5 – Časté | 2 – Střední | **Testovat** |
| **$O_2$** | 5 | 0 | 0 | 3 | 8 | 5 – Časté | 2 – Střední | **Testovat** |
| **Halogeny** | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 – Možné | 10 – Velmi vysoký | **Testovat** |
| **$CO_2$** | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 – Velmi vzácné | 2 – Střední | **Netestovat** |
| **$N_2$** | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 – Možné | 1 – Nízký | **Netestovat** |
| **Ar** | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 – Vzácné | 1 – Nízký | **Netestovat** |
| **Celkové uhlovodíky bez metanu** | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 – Možné | 2 – Střední | **Testovat** |
| **Pevné částice** | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 – Možné | 10 – Velmi vysoký | **Testovat** |

**5** kontaminantů → **TESTOVAT**

**3** kontaminanty → **NETESTOVAT**

# Přínosy metodiky

**Oproti současnému přístupu metodika:**

1. **Zohledňuje konkrétní podobu dodavatelského řetězce**
   Výroba, transport a skladování jsou hodnoceny individuálně.

2. **Uplatňuje rizikově orientovaný přístup**
   Vychází z pravděpodobnosti výskytu a dopadu kontaminantu.

3. **Zahrnuje kumulativní riziko**
   Zohledňuje opakovaný výskyt kontaminantů napříč řetězcem.

4. **Poskytuje jednoznačné rozhodnutí**
   TESTOVAT / NETESTOVAT na základě rozhodovací matice.

5. **Umožňuje efektivnější nastavení kontrol**
   Lepší zacílení analytických kontrol a využití zdrojů.

**HLAVNÍ PŘÍNOS METODIKY**

**STATICKÝ SEZNAM**
kontaminantů

→

**KONTROLA PODLE RIZIKA**
konkrétního dodavatelského řetězce

*Rozsah kontroly odpovídá reálným rizikům konkrétního dodavatelského řetězce.*

CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

# Děkuji za pozornost
# Prostor pro dotazy a diskuzi

**Ing. Adéla Svejkovská**

**adela.svejkovska@cdv.gov.cz**

telefon: 541 641 393
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Líšeňská 33a, 636 00 Brno
www.cdv.cz

ČISTÁ DOPRAVA

DOPRAVA PRO BUDOUCNOST