



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

**Přednáška 7**

**Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování**

**ÚROVEŇ II**

**Velitel posádky**

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Velitel posádky**.

Toto téma je k dispozici také na úrovních I, III a IV.

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny, výstupy HyResponse byly použity coby základ





### Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

### Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.



## Souhrn

Po nežádoucím úniku vodíku dochází k mísení uniklého plynu se vzduchem, čímž vznikají počáteční podmínky pro nebezpečí požáru a výbuchu. K nezapáleným únikům vodíku se řadí únik stlačeného plynného vodíku skladovaného pod vysokým tlakem v systémech a infrastruktuře FCH. Havarijní úniky stlačeného plynného vodíku se dělí do dvou hlavních kategorií: permeační úniky a vysokotlaké proudy. Jednou z důležitých otázek pro členy zásahových jednotek je, zda únik plynného vodíku způsobí vznik hořlavé směsi se vzduchem. Pomocí zákona podobnosti a teorie o nedostatečně roztržitém proudu dokáží členové zásahových jednotek vyhodnotit velikost hořlavé vodíkové obálky a vypočítat rozpad koncentrace vodíku podél osy proudění. Kromě toho se členové zásahových jednotek naučí, jak vypočítat dobu poklesu tlaku a posoudit dynamiku tlaku ve skladovací nádrži se známým objemem. V závěru této přednášky se posluchači obeznámí s prostředky pro zkrácení nebezpečné vzdálenosti od místa úniku a s opatřeními pro prevenci/zmírňování/detekci úniku nezapáleného vodíku.

## Klíčová slova

Nezapálený únik, zákon podobnosti, teorie nedostatečně roztržitého proudu, vodíková obálka, rozpad koncentrace vodíku, pokles tlaku, nebezpečná vzdálenost, zmírňující opatření, detekce

## Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
1. Cílové publikum.....	5
1.1 Popis úlohy: Velitel posádky.....	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky.....	5
1.3 Předchozí učení: Velitel posádky.....	5
2. Úniky stlačeného vodíku.....	6
3. Pokles tlaku v zásobníku stlačeného vodíku.....	8
4. Detekce úniků vodíku.....	11
Poděkování.....	12
Literatura a odkazy.....	12



## 1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Velitel posádky. Přednášky jsou k dispozici také na úrovních I, III a IV: Hasič, Velitel zásahu a Důstojník specialista.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni velitele posádky.

### 1.1 Popis úlohy: Velitel posádky

Velitelé posádek jsou zodpovědní za taktické nasazení hasičských týmů, které na základě konkrétních pokynů vycházejících ze SOP a informací získaných na místě zásahu zahajují a řídí činnost týmů, které plní stanovené úkoly zaměřené na dosažení požadovaných výsledků, jako jsou vyhledávání a záchrana osob, hašení a lokalizace požáru a vyprošťování.

### 1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky

Schopnost taktického rozhodování založená na znalostech, dovednostech a zkušenostech s chováním, které podporují úsudek při rozhodování za rychlého průběhu okolností. Na základě operačního učení a schopnosti interpretovat a v případě potřeby modifikovat SOP, využívat dříve nabyté informace a informace získané při incidentu se od velitele posádky očekává, že vytvoří a povede taktické operace poté, kdy vyhodnotí mimořádnou událost, určí priority a vyžádá si případnou další pomoc.

### 1.3 Předchozí učení: Velitel posádky

EQF 4 Faktické a teoretické znalosti v širokých souvislostech v rámci pracovního nebo studijního oboru. Řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k řešení konkrétních problémů v oblasti práce nebo studia. Vykonávání samostatné činnosti v rámci pracovních nebo studijních podmínek, které jsou obvykle předvídatelné, ale mohou se měnit; dohlížení na běžnou práci ostatních a převzetí určité odpovědnosti za hodnocení a zkvalitňování pracovních nebo studijních činností.

## 2. Úniky stlačeného vodíku

Jak je již známo z předchozích přednášek, vozidla s pohonem FC jsou vybavena palubními zásobníky vodíku s tlakem až 70 MPa a infrastruktura pro doplňování paliva pracuje s tlakem až 100 MPa [1]. Vzhledem k malé velikosti molekuly je vodík velmi náchylný k úniku. K únikům vodíku dochází převážně z ventilů a spojů [2], a to jak v interiéru, tak v exteriéru. Úniky mohou být nezapálené (tj. nereagující) nebo zapálené (tj. reagující). Přestože úplné prasknutí potrubí nebo protržení nádoby je poměrně vzácné, mělo by být považováno za věrohodný nejhorší možný scénář. Proto je třeba věnovat prevenci nežádoucího uvolňování vodíku zvláštní úsilí. Uvolnění vodíku prostřednictvím PRD nebo v důsledku prasknutí potrubí způsobuje vznik vysokotlakých proudů vodíku.

Tabulka 1 obsahuje přehled typů úniku vodíku a zařízení nebo součástí, které bývají jejich zdrojem [3].

Tabulka 1. Zdroje úniků a scénáře vypracované EIGA (2007) [3]

Zařízení/součást	Typ úniku
Potrubí	Malé dírkky, rozbočení potrubí
Příruby	Porucha těsnění, pohyby v důsledku působení tepla, průhyby materiálu
Svary	Praskliny ve svaru
Pájená spojení	Praskliny v pájce, roztavení pájky
Závitové potrubní spoje	Pohyby v důsledku působení tepla, úniky
Šroubové spoje	Netěsnost, závada těsnění, průhyby, oddělení materiálu
Hadicové spoje	Závada těsnění, oddělení materiálu, lidská chyba
Ventily	Netěsnost dřívku, závada těsnění, oddělení víka/tělesa ventilu v důsledku nárazu
Hadice	Perforace
Nástroje	Protržení prvku
Regulátory	Prasknutí diafragmy, závada těsnění, prasknutí v následných částech (přetlak)
Elektromagnetické ventily	Závada těsnění
Čerpadla	Perforace, závada těsnění
Válce	Perforace, protržení, permeační netěsnost

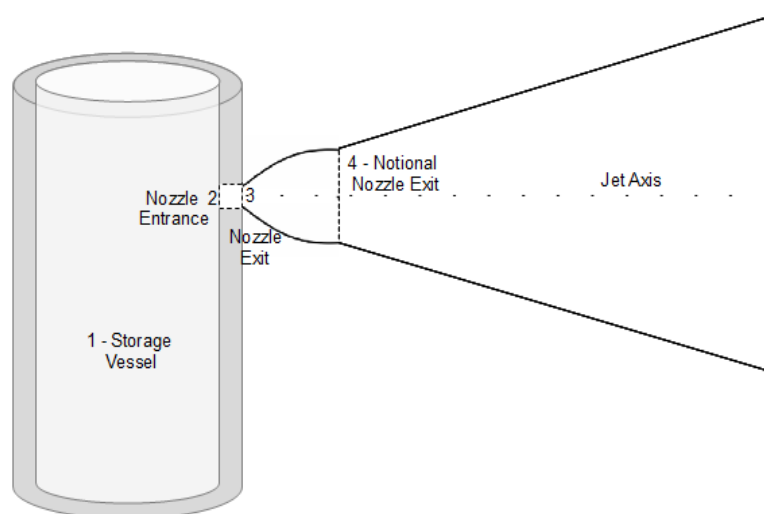
Typické průtoky uvolňovaného vodíku mohou být značně různé, od  $10^{-5}$  g/s u permeačních úniků až po  $10^5$  g/s v případě úniků na vodíkovém potrubí. Podle evropského nařízení o



schválení typu vozidel na vodíkový pohon (2010) je *bezpečná rychlost permeace* pro vozidla s FC při teplotách 15 a 20 °C omezena na 6 a 8 ml/h na 1 l objemu zásobní nádrže [4]. To znamená, že u vodíkového zásobníku s objemem 170 l bude rychlost permeace činit  $2,53 \times 10^{-5}$  g/s. Průtok při úniku z prasklého potrubí (u 150kW FC) bude činit přibližně 3 g/s. Únik z průmyslového potrubí (průměr 30 cm) při tlaku  $p = 2,5$  MPa bude mít průtok 100 kg/s. V současné době se při uvolňování prostřednictvím PRD (s průměrem 5,08 mm) ze zásobníku při tlaku 35 MPa vytvoří průtok 390 g/s.

Uvolňování vodíku permeací se liší od proudění a tryskání: vodík se uvolňuje pomalu, ve velmi malém množství, rovnoměrně podél povrchu skladovacího zásobníku. Rychlost permeace vodíku konkrétním materiálem závisí na několika faktorech, např. na teplotě, vnitřním tlaku a tloušťce membrány. Čím vyšší je skladovací tlak, tím vyšší je rychlost permeace (viz přednášku 3 „Skladování vodíku“). Rozptyl prostupujícího vodíku ovlivňují tři hlavní jevy: vztlak, difuze a přirozená ventilace. Pronikající vodík se v místnosti podobné garáži rozdělí homogenně [5]. Maximální přípustná rychlost permeace v místnosti podobné garáži činí při 20 °C pro osobní automobil 8 ml/hod/l a pro autobus s FC 5 ml/hod/l [6]. Simulace provedené v rámci projektu HySAFER na Ulsterské univerzitě prokázaly, že při této míře permeace nepředstavuje rozptyl vodíku v typické garáži problém [5].

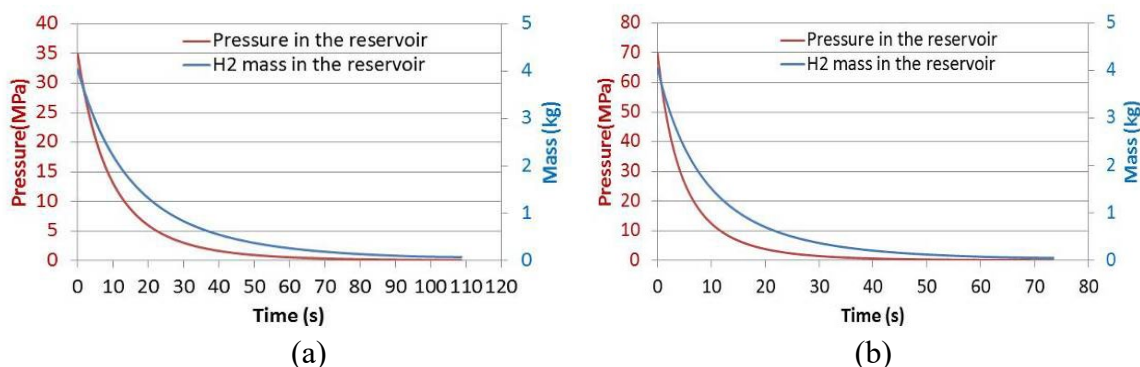
Neplánované uvolnění vodíku skladovaného pod vysokým tlakem může vytvořit silně *nedostatečně roztržštěný* (tlak na výstupu z trysky je vyšší než atmosférický tlak) turbulentní proud, který se chová jinak než proudy *roztržštěné* (tlak na výstupu z trysky je roven atmosférickému tlaku). Na tento jev byly v minulosti provedeny podrobné studie. Schematické znázornění úniku vodíku z vysokotlakého skladovacího zásobníku je uvedeno na obrázku 1. Většina úniků ze skladovacích zásobníků a zařízení bude mít přinejmenším zpočátku podobu nedostatečně roztržštěného proudu [1].



Obrázek 1. Schéma uvolňování vodíku z vysokotlakého skladovacího zásobníku.

### 3. Pokles tlaku v zásobníku stlačeného vodíku

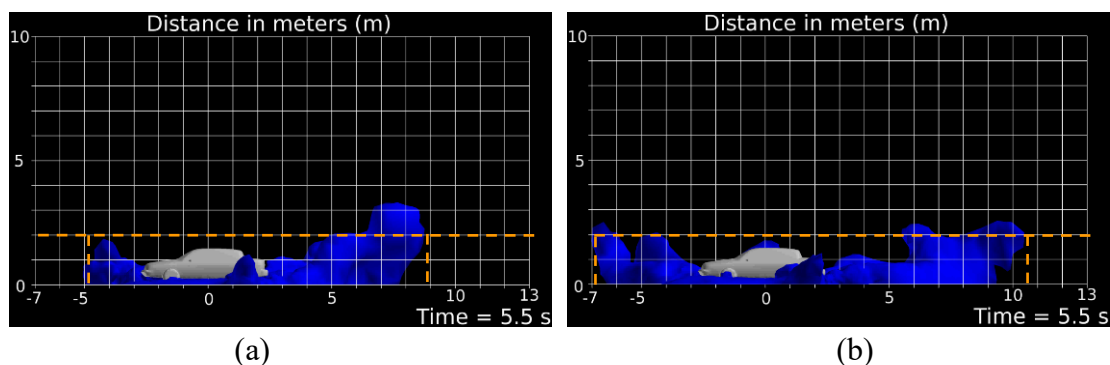
V reálných podmínkách neprobíhá uvolňování vodíku z vysokotlakého zásobníku jako stabilní proces, ale jako pokles tlaku, při kterém tlak v zásobníku pozvolna klesá, dokud se zásobník zcela nevyprázdní. K simulaci dynamiky tlaku v zásobníku vodíku při nedostatečně roztržitém proudu lze použít již dříve zmiňovaný model fiktivní trysky. Byl použit nástroj e-Laboratoře „Adiabatic blow-down of storage tank“ (Adiabatický pokles tlaku ve skladovacím zásobníku). Výsledky jsou uvedeny na obrázku 2. Při uvolňování z nádrže s objemem 171 l a tlakem 35 MPa prostřednictvím otvoru s průměrem 4,2 mm je celková doba poklesu tlaku kratší než 110 s (<2 minuty) a přechod z nedostatečně roztržitého proudu na roztržitý nastává v 85 s. Při uvolňování z otvoru s průměrem 4,2 mm při tlaku 70 MPa s identickou hmotností činí celková doba poklesu tlaku méně než 75 s, přičemž přechod z *nedostatečně roztržitého* na *roztržitý proud* nastává v 58. sekundě [7].



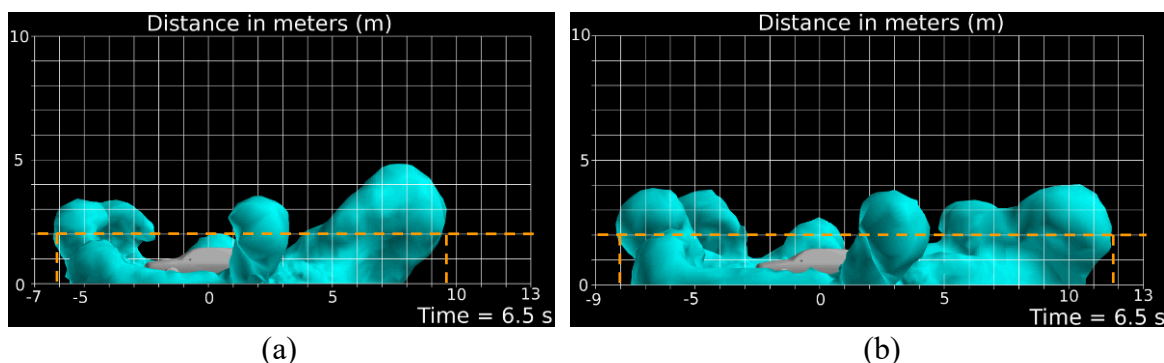
Obrázek 2. Adiabatický pokles tlaku v zásobnících z 35 MPa (a) a 70 MPa (b) (průměr otvoru – 4,2 mm) [7].



Jak je patrné na obrázku 3, nejkratší bezpečná vzdálenost od místa úniku pro členy zásahových jednotek bez tepelného ochranného oděvu činí 8,8 m a 10,5 m u skladovacího tlaku 35 MPa, resp. 70 MPa. Nebezpečná vzdálenost při úniku ze zásobníku vodíku s tlakem 70 MPa je téměř o 20 % delší než v případě zásobníku s tlakem 35 MPa. V obou případech se největší rozměry vodíkových obálek s koncentrací 8 obj. % vytvořily v blízkosti podlahy v čase 5,5 s po otevření zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a nebezpečné vzdálenosti se zkrátí.



Obrázek 3. Vodíkové obálky s koncentrací 8 obj. % zaznamenané 5,5 s po začátku uvolňování: a) skladovací tlak 35 MPa, b) skladovací tlak 70 MPa (rozsah největší nebezpečné vzdálenosti za předpokladu maximální tělesné výšky členů zásahových jednotek 2 m) [7].

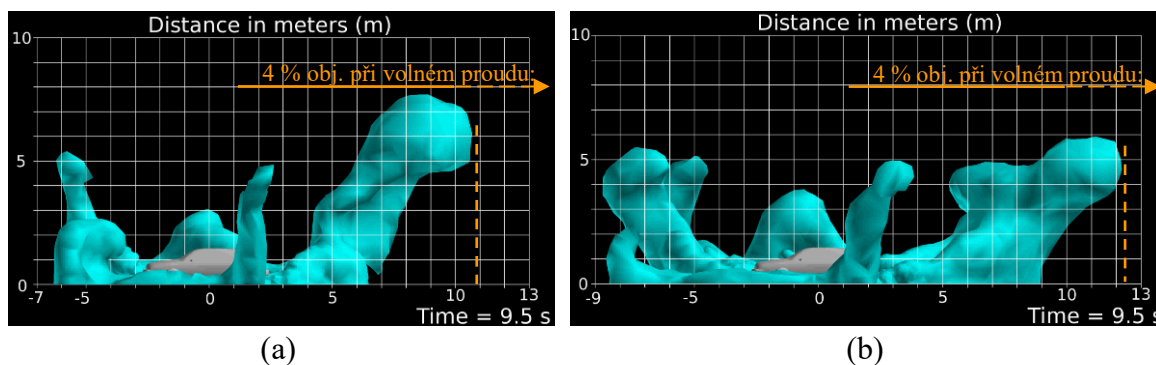


Obrázek 4. Vodíkové obálky s koncentrací 4 obj. % zaznamenané 6,5 s po začátku uvolňování: a) skladovací tlak 35 MPa, b) skladovací tlak 70 MPa (rozsah největší nebezpečné vzdálenosti za předpokladu maximální tělesné výšky členů zásahových jednotek 2 m) [7].

Jak je znázorněno na obrázku 4, největší nebezpečné vzdálenosti pro uvolnění tlaku 35 a 70 MPa činí pro veřejnost na zemi 9,4 a 11,8 m. V obou případech byly největší obálky vodíku s koncentrací 4 % obj. zaznamenaný u podlahy v čase 6,5 sekundy po aktivaci zařízení TPRD. Poté se rozměry obálky i nebezpečné vzdálenosti zmenší. Na obrázku 4 jsou znázorněny pouze obálky 4 % obj. pro výšku nižší než 2 m (oranžové mezní čáry). Největší hořlavé obálky pro celou oblast jsou uvedeny na obrázku 5; lze z nich posoudit nebezpečné vzdálenosti v okolí [7].

Z obrázku 5 je patrné, že v případě přívodu vzduchu do budovy činí největší nebezpečné vzdálenosti 10,7 m a 12,3 m při úniku ze zásobníků s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa. Nebezpečná vzdálenost při uvolnění tlaku 70 MPa se v porovnání s uvolněním tlaku 35 MPa prodlouží o 15 %. V obou případech se největší rozměry obálky s koncentrací 4 % obj.

vyskytují 9,5 sekundy po aktivaci zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a nebezpečné vzdálenosti se zkrátí. Jak vyplývá z obrázku 5, porovnáme-li nebezpečné vzdálenosti od těchto proražených trysek s nebezpečnými vzdálenostmi vypočtenými pro volné trysky (27,4 m při skladovacím tlaku 35 MPa a 35,4 m při skladovacím tlaku 70 MPa), výsledky ukazují výrazné zkrácení o více než 60 % a 65 % v případě uvolnění z 35 MPa, resp. 70 MPa.



Obrázek 5. Rozsah vodíkové obálky s koncentrací 4 % obj. při nezapáleném úniku ze skladovacích zásobníků: a) tlak 35 MPa, b) tlak 70 MPa [7].

Závěrem lze konstatovat, že studie CFD, kterou provedli Li a kol. [7], prokázala tyto skutečnosti:

- v případě uvolnění nezapáleného vodíku ze skladovacích zásobníků pod tlakem 35 MPa a 70 MPa se největší nebezpečné vzdálenosti vyskytují do 10 s po otevření TPRD a doba trvání nebezpečí spojeného s únikem vodíku je kratší než 2 min,
- deterministické nebezpečné vzdálenosti pro úniky nezapáleného vodíku z TPRD namířené svisle dolů pod vozem s pohonem FC jsou výrazně kratší než v případě volného proudění,
- jak pro veřejnost, tak pro osoby, které nejsou vybaveny tepelným ochranným oděvem, se maximální nebezpečná vzdálenost od úniku nezapáleného vodíku pohybuje od 8 do 12 m v závislosti na tlaku v zásobníku,
- aby se zajistilo, že koncentrace vodíku bude v místě přívodu vzduchu do budov vždy nižší než LFL (4 % obj.), měla by být nebezpečná vzdálenost stanovena nejméně na 11 m pro úniky 35 MPa a na 13 m pro úniky 70 MPa.

Uvolňováním nezapáleného vodíku v uzavřených prostorech se budeme podrobněji zabývat v další přednášce „Uzavřené prostory“.

Obecně platí, že hlavní bezpečnostní strategií při úniku vodíku představuje minimalizace jeho hmotnostního průtok, například zmenšením velikosti případného úniku použitím co nejmenšího světlého průměru potrubí. Jestliže hořlavá směs vodíku a vzduchu představuje nepřijatelné riziko, ukazuje se z hlediska prevence hromadění vodíku na nebezpečnou



koncentraci jako nejúčinnější strategie „nezasahovat do úniku“ [1]. Popis prevence a zmírnění úniků nezapáleného vodíku je uveden níže.

#### 4. Detekce úniků vodíku

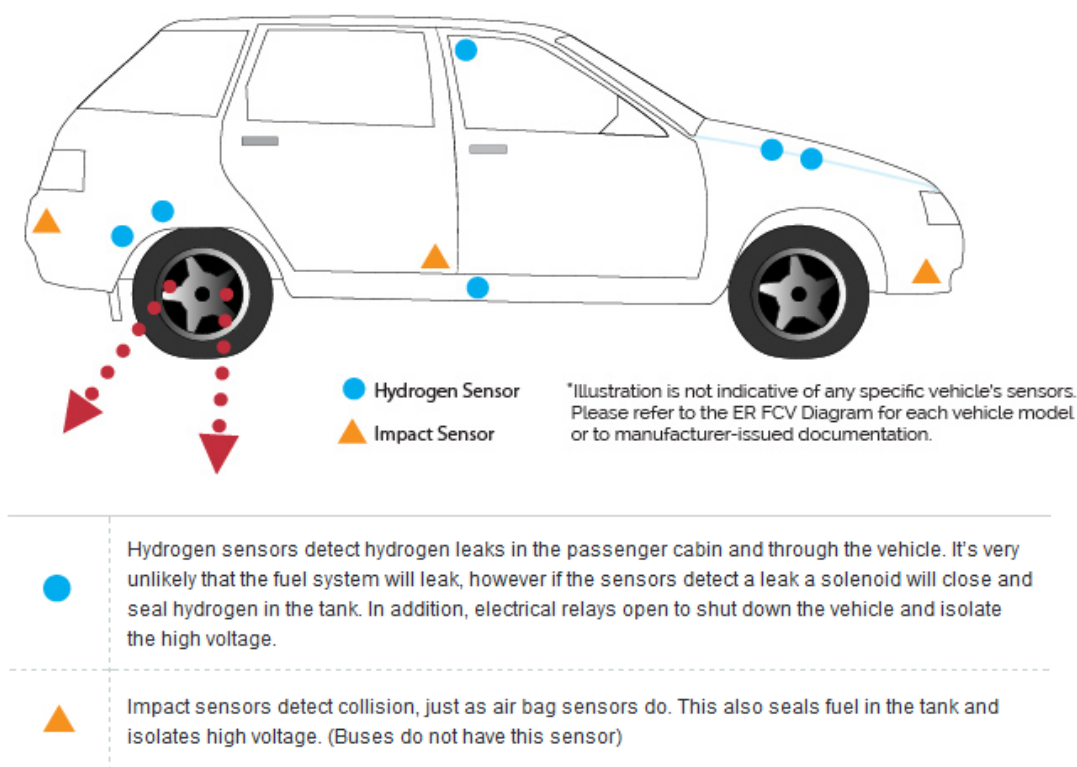
Je důležité vědět, že v případě vodíkových bezpečnostních technologií nepředstavují senzory dokonalou detekční strategii, a to z důvodu vztlaku a difuzivity vodíku. Například ve velké hale nebo ve venkovním prostředí budou možnosti využití vodíkového senzoru značně omezené. Rozmístění senzorů je proto třeba pečlivě zvážit a k simulaci scénářů úniku použít nástroje, jako je CFD, které poskytnou informace o vhodném umístění senzorů. Pro ochranu personálu a zařízení jsou nezbytné jak pevně umístěné, tak osobní/ruční sledovací zařízení.

Navrhované rozmístění vodíkových senzorů je podrobně rozepsáno níže:

- místa, kde může dojít k úniku nebo rozliti vodíku,
- u vodíkových přípojek, které jsou běžně oddělené (například přípojky pro doplňování vodíku),
- místa, kde by se vodík mohl hromadit,
- v potrubích pro přívod vzduchu do budovy, pokud by jimi vodík mohl vnikat dovnitř,
- ve ventilačních šachtách budov, pokud se uvnitř budovy může uvolnit vodík.

Existují také požadavky na montáž vodíkových senzorů do vozidel s pohonem FC, které řidiče upozorní na možný únik. Rozmístění detektorů vodíku v elektrických vozidlech s pohonem na palivové články (FCEV) je na obrázku 6 znázorněno modrými body [10]:

- výfukové potrubí (řízení procesu),
- kabina pro cestující (bezpečnost),
- motor (bezpečnost),
- svazek palivových článků (bezpečnost).



Obrázek 6. Možné rozmístění vodíkových senzorů ve vozidle FCEV [10].

## Poděkování

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse.

## Literatura a odkazy

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), e-kniha k bezplatnému stažení
2. Projekt HyFacts. Kapitola R. Hydrogen releases and dispersion (Uvolňování a rozptyl vodíku). K dispozici na adrese: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [přístup k datu 12.11.2020].
3. EIGA, Evropské sdružení technických plynů (2007). Stanovení bezpečnostních vzdáleností. Dokument IGC 75/07/E.
4. Nařízení Komise (EU) č. 406/2010 ze dne 26. dubna 2010, kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 79/2009 o schvalování typu vozidel na vodíkový pohon. Úřední věstník Evropské unie. Svazek 53, 18. května 2010. K dispozici na adrese:

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF>  
[přístup k datu 12.11.2020].

5. Saffers, JB, Makarov, DV a Molkov, VV (2011). Modelování a numerická simulace prostupování a šíření vodíku v garáži s adiabatickými stěnami a nehybným vzduchem. Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36(3), s. 2582–2588.
6. Adams, P, Bengaouer, A, Cariteau, B, Molkov, V a Venetsanos, AG (2011). Přípustná míra prostupování vodíku ze silničních vozidel. Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36, s. 2742–2749.
7. Li, Z, Makarov, D, Keenan, J, Molkov, V (2015). CFD studie uvolňování nezapáleného a zapáleného vodíku z TPRD pod vozidly s palivovými články. 6. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, 19.–21. října 2015, Jokohama, Japonsko.
8. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. K dispozici na adrese: <http://cafcp.org/>  
[přístup k datu 12.11.2020].