



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 6

Kritéria poškození zdraví osob a majetku

ÚROVEŇ IV

Důstojník specialista

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Důstojník specialista** a vyšší.

Toto téma je k dispozici také na úrovních I–III.

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, České republiky, Švýcarska a Norska.

Souhrn

Tato přednáška poskytuje členům zásahových jednotek cenné informace o dopadech úniku vodíku, požárů a výbuchů na zdraví osob a životní prostředí. Dále pojednává o škodách na konstrukcích a zařízeních způsobených požáry vodíku a přetlakem. Zaměřuje se především na účinky tepla a přetlaku na člověka, přírodu a zastavěné oblasti. Znalost kritérií škod a poškození je velmi důležitá pro posouzení stavu na místě nehody a pro správné rozhodování o zásahu. Ačkoli účelem této přednášky není poskytnout členům záchranných jednotek absolutní prahové hodnoty, měli by si být vědomi akceptačních kritérií pro veřejnost, provozovatele, uživatele zařízení FCH i pro sebe. Tato přednáška také seznamuje členy záchranných jednotek se systémem značení. Pojednává také o některých požadavcích na osobní ochranné prostředky.

Klíčová slova

Vodíková havárie, tepelné záření, přetlak, kritéria poškození, osobní ochranné prostředky

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
Obsah	4
1. Cílové publikum.....	5
1.1 Popis úlohy: Specialista	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista	5
1.3 Předchozí učení: Specialista.....	5
2. Úvod a cíle	5
2. Hlavní definice	6
3. Zdravotní rizika související s únikem vodíku	7
3.1 Plynný vodík	8
3.2 Zkapalněný vodík.....	11
4. Škodlivé účinky spalování vodíku na člověka.....	13
4.1 Vliv teploty vzduchu	13
4.2 Vliv přímého kontaktu s vodíkovým plamenem	15
4.3 Vliv sálavého tepelného toku z vodíkových požárů.....	16
4.4 Účinky přetlaku na člověka.....	18
5. Škody na konstrukcích, vybavení a životním prostředí způsobené vodíkovým požárem.....	21
6. Vliv přetlaku na konstrukce a zařízení	22
7. Souhrn kritérií přijatelnosti pro život a majetek.....	25
8. Označování vodíkových systémů	26
9. Osobní ochranné prostředky	29
10. Vlivy na životní prostředí	31
Poděkování	31
Literatura a odkazy	31

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Důstojník specialista a vyšší. Tato přednáška je k dispozici také na úrovni I: Hasič.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni důstojníka specialisty.

1.1 Popis úlohy: Specialista

Specialisté pomáhají veliteli zásahu radou, řízením a dohledem nad technickými operacemi, které zahrnují využití znalostí, dovedností nebo vybavení souvisejícího s konkrétním rizikem nebo činností při zásahu. Typické události se týkají nebezpečných materiálů, dopravních prostředků, klimatických jevů, narušení konstrukcí a logistiky záchranných prací.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista

Vědecký, technický a empirický základ v dané oblasti s dovednostmi rozšířenými o zkušenosti, které umožňují aplikovat tyto informace a znalosti interpretovaným a užitečným způsobem tak, aby velitel zásahu a ostatní členové jednotek prvotního zásahu pod vedením specialisty mohli účinně a bezpečně reagovat na stav nouze.

1.3 Předchozí učení: Specialista

EQF 5 Komplexní, specializované, faktické a teoretické znalosti v oboru práce nebo studia a povědomí o mezích těchto znalostí. Ucelená řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k rozvoji tvůrčích řešení abstraktních problémů. Výkon řízení a dohledu v kontextu pracovních nebo studijních činností, kde dochází k nepředvídatelným změnám; přezkum a rozvoj dovedností vlastních i ostatních spolupracovníků.

2. Úvod a cíle

Primárním zájmem vodíkové bezpečnosti je ochrana životů a majetku. Proto je důležité stanovit kritéria pro provozovatele, uživatele, veřejnost a také pro členy zásahových jednotek, kteří mohou být postiženi následky nehody nebo havárie v systému nebo na infrastruktuře FCH. Kritéria přijatelnosti pro zákazníky a pracovníky podílející se na provozu, kontrole a údržbě zařízení a infrastruktury FCH budou podobná, zatímco pro širokou veřejnost, která se náhodou ocitla v blízkosti nehody/havárie, by měl být přístup konzervativnější. Podle britské normy BS 7974 (2004) jsou hasiči považováni za samostatnou kategorii postižených osob. V okamžiku nehody/havárie nejsou přítomni v zařízení FCH a často přijíždějí na místo, když jsou podmínky nejnebezpečnější, a musí plnit své profesní povinnosti. Jsou vystaveni nebezpečí možného zřícení budov/konstrukcí a následkům tlakové vlny. Díky tomu, že jsou vybaveni speciálními osobními ochrannými pomůckami (OOP), mohou odolávat vyšším úrovním tepelného záření a teplot, stejně jako dusivému a toxickému ovzduší. Kromě toho je velmi důležité umístění osoby v infrastruktuře FCH v době nehody/havárie. Následky vodíkové nehody/havárie mohou být okamžité a na lidi mohou mít různý dopad v závislosti na jejich



blízkosti ke zdroji poškození. Lidé, kteří se nacházejí uvnitř budov, budou tlakovou vlnou zasaženi s vyšší pravděpodobností než ti, kteří se nacházejí venku.

Vytvoření harmonizovaných kritérií škodlivosti nebo prahových hodnot pro charakterizaci potenciálních dopadů nebezpečných jevů jde nad rámec projektu HyResponder. Všechny zúčastněné strany by měly využít normy platné v jejich zemi.

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky schopni:

- popsat hlavní zdravotní rizika spojená s úniky nezapáleného vodíku, fyzikálními výbuchy (prasknutí stlačené nádoby), požáry, deflagrací a detonacemi plynného a zkapalněného vodíku,
- definovat škodlivé účinky spojené s únikem nezapáleného vodíku v uzavřených prostorách:
 - hladinu hluku,
 - vliv teploty vodíku,
 - vliv přetlaku při výskytu jevu tlakové špičky.
- definovat škodlivé účinky spalování vodíku na člověka:
 - vliv teploty spalované atmosféry,
 - vystavení sálavému tepelnému toku,
 - účinek přetlaku.
- znát zásady a používat rámec kritérií škod na zdraví osob a životním prostředí, kritérií škod na konstrukcích a zařízeních:
 - teplota vzduchu,
 - tepelná dávka,
 - tepelný tok,
 - přetlak atd.
- uvést nebezpečné a smrtelné dávky, 50% (LD50) úroveň tepelné dávky,
- rozlišit přímé a nepřímé škodlivé účinky přetlaku na člověka,
- popsat vztah zejména mezi škodami na konstrukcích, zařízeních a životním prostředím způsobenými vodíkovými požáry / výbuchovými vlnami a úrovněmi sálavého tepelného toku a přetlaku,
- rozpoznat systémy označování skladování plynného a zkapalněného vodíku u aplikací s vodíkovými a palivovými články,
- vyjmenovat osobní ochranné prostředky, které by měli používat nejen členové zásahových jednotek, ale také zaměstnanci pracující v zařízení FCH,
- nastínit vliv vodíku na životní prostředí.

2. Hlavní definice

Je důležité, aby členové zásahových jednotek byli schopni vyhodnotit dopad vodíkových nehod/havárií na ohrožení života osob a materiální škody. Pro definování a posouzení následků



nehody/havárie je k dispozici několik metod v závislosti na její závažnosti, expozici, době trvání a posuzovaném cíli (tj. veřejnost, přítomné osoby, konstrukce, budovy, zařízení atd.). V současných i budoucích přednáškách se používají některé užitečné definice.

Akceptační kritéria jsou zadávací podmínky, dle kterých se posuzuje bezpečnost návrhu zařízení/infrastruktury FCH [1].

Nezpůsobilost je stav, kdy člověk nefunguje adekvátně a není schopen uniknout z neudržitelných podmínek [2].

Přítomné osoby jsou osoby, které se nacházejí v zařízení/infrastruktuře FCH, včetně pracovníků podílejících se na jeho provozu a údržbě, jakož i zákazníků/návštěvníků [1].

Bezpečné místo je předem určené místo uvnitř nebo vně zařízení/infrastruktury FCH, kde osoby nejsou bezprostředně ohroženy účinkem úniku vodíku, požáru nebo výbuchu [1].

Veřejnost jsou lidé přítomní mimo vymezené ohraničení zařízení/infrastruktury FCH.

Citlivá oblast je objekt, infrastruktura nebo zařízení obsahující zásoby nebezpečných látek, které se mohou stát zdrojem škod, pokud se stanou terčem vodíkové nehody/havárie [1].

Možnost přežití je maximální expozice, kterou lze obdržet se zanedbatelnou statistickou pravděpodobností úmrtí/poškození a bez narušení schopnosti osoby uniknout [1].

Udržitelnost je maximální snesitelná expozice nebezpečí z vodíkové nehody/havárie, aniž by došlo k porušení bezpečnostních cílů [1].

Prahová hodnota je maximální intenzita nebo dávka pro dané nebezpečí, která odpovídá specifické fyziologické (pro člověka) nebo strukturální (pro konstrukce a zařízení) reakci [1].

3. Zdravotní rizika související s únikem vodíku

Plynný vodík je lehčí než vzduch, a proto rychle stoupá vzhůru a při nežádoucím úniku v otevřeném prostředí se může ve vzduchu rychle zředit. Náhodný únik vodíku v uzavřeném prostoru / uvnitř budov může způsobit až smrt osob udušením. Únik vodíku v uzavřených prostorech navíc představuje nebezpečí výbuchu. Směsi vodíku a vzduchu jsou hořlavé díky širokému rozsahu hořlavosti, od 4 do 75 % obj. vodíku. Při úniku do vzduchu a za přítomnosti zdroje zapálení vodík hoří za vzniku vody a tepla. Pravděpodobnost zapálení vodíku po jeho uvolnění je velmi vysoká, protože má nízkou minimální zápalnou energii: k zapálení vodíku stačí i výboj statické elektřiny. U zasahujících osob není nutné používat ochranný oděv, aby se zabránilo výboji statické elektřiny, protože výboj statické elektřiny stačí k zapálení vodíku pouze ve vzácných případech. Podrobnější informace naleznete v přednášce 8 – Zdroje a zapálení a jeho prevence. V případě požáru je vodíkový plamen na denním světle takřka neviditelný a jeho teplota může dosáhnout až 2 000 °C. Ačkoli záření vodíkového plamene je v porovnání s uhlovodíkovým plamenem nízké, existuje riziko, že zasahující osoby vstoupí do plamene. Šíření plamene směsí vodíku a vzduchu je ve srovnání s CNG (stlačený zemní plyn)



a LPG (zkapalněný ropný plyn) mnohem rychlejší, a proto nelze vyloučit riziko přechodu k detonaci. Co se týče kapalného vodíku, hlavní rizika u něj souvisejí s extrémně nízkými teplotami a možným odpařováním (1 l kapalného vodíku se při NTP odpaří na 870 l plynu), což může ve vnitřních prostorech vést i k udušení.

3.1 Plynný vodík

Plynný vodík je plyn bez chuti, barvy a zápachu. Je lidskými smysly nezjistitelný. Použití odorantů (např. merkaptanů) ve skladovacích nádobách není možné, protože mohou způsobit otravu palivových článků. Vodík není karcinogenní látka. Neočekává se, že by vodík měl mutagení¹, teratogení², embryotoxické³ nebo reprodukčně toxické účinky. Neexistují žádné důkazy o nepříznivých účincích na kůži nebo oči vystavené vodíkové atmosféře. Vysokotlaké proudy vodíku však mohou proniknout holou kůží [3]. Vodík nelze požít. Vdechování vodíku však může vést k vytvoření hořlavé směsi v plicích člověka.

Podobně jako u jiných plynů vede zvýšení koncentrace vodíku ke snížení obsahu kyslíku ve vzduchu, což může vést k *udušení*. Vodík je klasifikován jako jednoduchá *dusivá látka*; nemá žádnou mezní hodnotu (TLV) [4]. Vysoké koncentrace vodíku ve vzduchu v plně/částečně uzavřených prostorech vedou ke vzniku *atmosféry s nedostatkem kyslíku*. U osob vystavených působení takového ovzduší se mohou vyskytnout následující příznaky: bolesti hlavy, závratě, ospalost, bezvědomí, nevolnost, zvracení, potlačení všech smyslů atd. Postižená osoba může mít namodralou pokožku a za určitých okolností může dojít i k úmrtí. Při vdechnutí vodíku a výskytu výše uvedených příznaků by měla být osoba přemístěna na čerstvý vzduch. Při ztíženém dýchání by jí měl být podán kyslík. Jestliže postižený nedýchá, je třeba zahájit umělé dýchání.

Tabulka 1 uvádí fyziologické účinky způsobené nedostatkem kyslíku. Vodík může způsobit udušení zředěním kyslíku ve vzduchu na koncentraci nižší než 19 % obj., což je bezpečná hodnota. Úrovně koncentrace kyslíku pod 19,5 % objemových jsou pro člověka biologicky neaktivní a obvykle nejsou pozorovány žádné účinky nedostatku kyslíku. Při koncentraci kyslíku pod 12 % obj. může dojít k okamžitému bezvědomí bez předchozích varovných příznaků.

¹ Vyvolání trvalých přenosných změn v množství nebo struktuře genetického materiálu buněk nebo organismů.

² Vrozené vady způsobené toxickým účinkem na embryo nebo plod.

³ Toxické účinky látky přestupující hemoplacentární bariérou na embryo.

Tabulka 1. Reakce člověka na nedostatek kyslíku [4]

Koncentrace H ₂ obj. %	Koncentrace O ₂ obj. %	Fyziologický účinek
0–9	21–19	Žádné specifické příznaky
9–28	15–19	Snížená schopnost vykonávat úkoly, může vyvolat rané příznaky u osob se srdečními, plicními nebo oběhovými potížemi
28–42	12–15	Hlubší dýchání, rychlejší puls, špatná koordinace
42–52	10–12	Závratě, špatný úsudek, lehce namodralé rty
52–62	8–10	Nevolnost, zvracení, bezvědomí, popelavě šedý obličej, mdloby, mentální selhání, doba tolerance 5 min
62–71	6–8	Bezvědomí do 3 minut, smrt do 8 minut. 50 % úmrtí a 50 % zotavení při zahájení terapie do 6 min, 100 % zotavení při zahájení terapie do 4–5 min
71–86	3–6	Kóma za 40 s, křeče, zástava dýchání a smrt
86–100	0–3	Smrt do 45 s

Konstrukce systému by měla zabránit možnosti udušení osob pracujících v uzavřených prostorech [4]. Konstrukce systému musí zajistit, aby do uzavřeného prostoru nemohli vstoupit pracovníci, pokud nejsou striktně dodrženy postupy pro vstup do uzavřeného prostoru. Před vstupem do oblasti nehody/havárie se zasahujícím osobám doporučuje zkontrolovat koncentraci kyslíku (v případě přítomnosti nebezpečné koncentrace není k dispozici pachová výstraha) a používat autonomní dýchací přístroj. Koncentraci vodíku je třeba měřit pomocí vhodného detektoru [5]. Tento bod je třeba zdůraznit: je naprosto nezbytné používat vhodný monitor plynného vodíku.

Maximální hodnota koncentrace vodíku ve vzduchu pro osoby přítomné v zařízení FCH bude přibližně 40 % obj., protože tato koncentrace odpovídá úrovni, při které může fyziologický dopad silně ovlivnit lidské zdraví a schopnost evakuace. Únosná hodnota pro veřejnost se bude pohybovat okolo 9 % obj.; při překročení této hodnoty mohou lidé pocítit zdravotní potíže. U osob vybavených osobními ochrannými prostředky (OOP), jako je dýchací přístroj, je přípustná hodnota obsahu vodíku ve vzduchu vyšší a může dosáhnout až 100 % obj. Pobyt členů zásahových jednotek v hořlavé atmosféře, kterou tvoří směs vodíku se vzduchem, se však během zásahu nedoporučuje.

Dalším typem nebezpečí, které by měli členové zásahových jednotek zohlednit, je *akustické nebezpečí* související s únikem vodíku pod vysokým tlakem. Zdravotní důsledky různých hladin hluku jsou uvedeny na obrázku 1. Při hladinách hluku nad 85–90 dB může dojít k poškození sluchu a doporučuje se používat ochranu sluchu. Hranice prahu bolesti činí 130 dB; při hladinách hluku vyšších než 140 dB hrozí okamžitá ztráta sluchu. Pamatujte, že výbuch

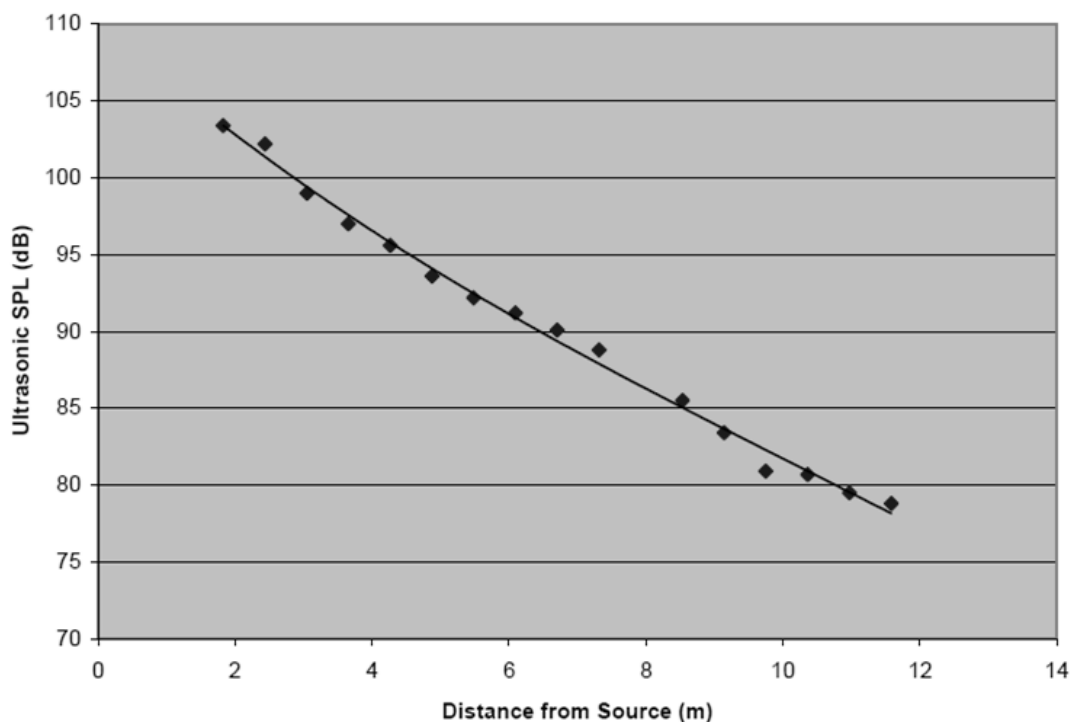
může vést k *akustickému traumatu* – náhlé změně sluchového smyslu v důsledku jednorázového působení výbuchu nebo zvuku [7].

level	Noise source	Health effects
140dB	Jet plane take off, firecracker, gun shot	Sudden damage to hearing
130dB	Pain threshold exceeded	
120dB	Ambulance siren, pneumatic drill, rock concert	
110dB	Night clubs, disco	
100dB	Motor cycle at 50km/h	
90dB	Heavy goods vehicle at 50km/h	
85dB	Hearing protection recommended in industry	Hearing loss, tinnitus
75dB		Cardiovascular effects
70dB		Sleep disturbances
65dB		Stress effects
60dB		Annoyance
55dB	Desirable outdoor level	
50dB	Normal conversation level	
40dB	Quiet suburb	
30dB	Soft whisper	
20dB	Normal conversation level	

Source: Nopher, a European Commission concerted action to reduce the health effects of noise pollution.
<http://www.ucl.ac.uk/noiseandhealth/EC%20Brochure1.pdf>

Obrázek 1. Zdravotní účinky hladin hluku [6]

Jak ukazuje obrázek 2, i malé úniky vodíku mohou být zdrojem dostatečného ultrazvukového šumu, který umožňuje detekci ve většině průmyslových prostředí [7]. Zatímco *slyšitelný akustický hluk* se v průmyslových areálech obvykle pohybuje v rozmezí 60 až 110 dB, *hladiny ultrazvukového hluku* (frekvenční rozsah 25–100 kHz) se pohybují v rozmezí 68 až 78 dB v oblastech s vysokou hladinou hluku, kde jsou instalovány rotující stroje, jako jsou kompresory a turbíny, a jen zřídka přesahují 60 dB v oblastech s nízkou hladinou hluku. Ultrazvukové detektory úniku plynu proto mohou detekovat únik vodíku, aniž by byly ovlivněny hlukem na pozadí. A protože přístroje reagují na uvolňování plynu, nikoli na plyn samotný, mohou upozornit velmi rychle, často během milisekund. Jak vyplývá z obrázku 2, hladina ultrazvukového akustického tlaku (SPL) je takřka nepřímě úměrná vzdálenosti od zdroje hluku (tj. úniku vodíku).



Obrázek 2. Hladina akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje úniku vodíku (průměr úniku: 1 mm; tlak: 5 515 kPa; rychlost úniku: 0,003 kg/s) [7]

Zařízení pod tlakem 200 bar a s lyrovitým vývodem o průměru otvoru 4 mm produkuje hluk 130 dB. Během testů provedených společností Air Liquide na potrubí o průměru 5 mm, které bylo natlakováno na 700 bar, se hladina hluku pohybovala od 100 do 140 dB. Úniky vodíku o akustickém tlaku 50–60 dB nepředstavují pro osoby v blízkosti žádné riziko, pokud se nenacházejí v uzavřeném prostoru [8].

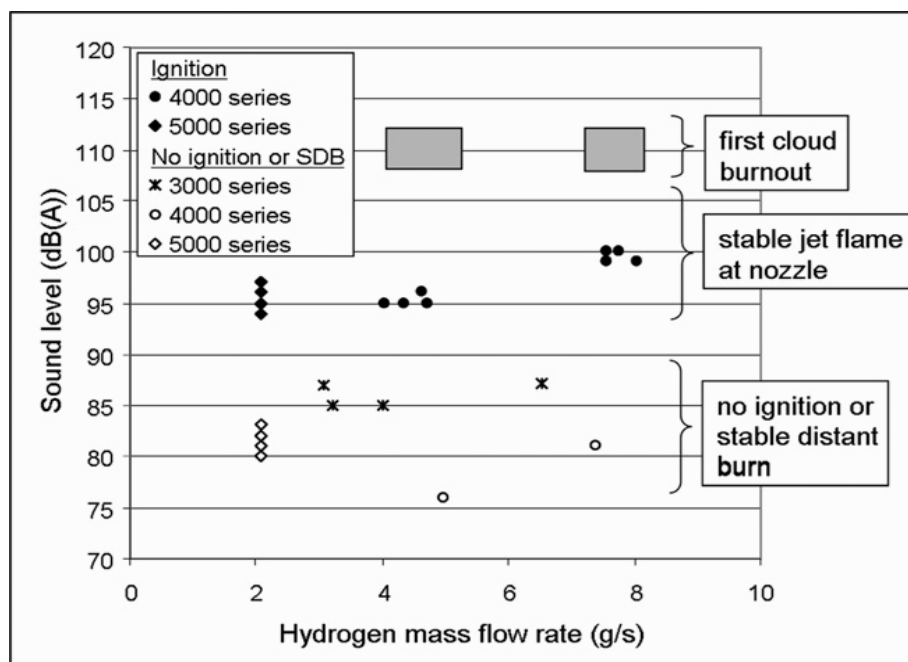
3.2 Zkapalněný vodík

Zkapalněný vodík se skladuje/používá za extrémně nízkých teplot díky svému nízkému bodu varu (-253 °C). Zdravotní rizika související s únikem zkapalněného vodíku jsou uvedena níže.

- Styk s kapalným vodíkem nebo potřísnění kůže či očí může způsobit vážné popáleniny v důsledku *omrznutí nebo podchlazení*.
- Ke *kryogenním popáleninám* může dojít také v důsledku styku nechráněných částí lidského těla s chladnými tekutinami nebo chladnými povrchy.
- Vdechování studených vodíkových par může způsobit *dýchací potíže* a může vést až k *udušení*.
- Přímý fyzický kontakt s LH_2 , chladnými výparů nebo chladným zařízením může způsobit vážné *poškození tkání*. Chvilkový kontakt s malým množstvím kapaliny nemusí představovat tak velké nebezpečí popálení, protože odpařující plynný vodík

může vytvořit ochranný film. Nebezpečí umrznutí hrozí při úniku velkého množství a dlouhodobé expozici⁴.

- Zaměstnanci by se neměli dotýkat studených kovových částí a měli by nosit *ochranný oděv*. Postiženou oblast musí také chránit volným krytím.
- Při poklesu vnitřní tělesné teploty na 27 °C a méně hrozí *srdeční poruchy* a při poklesu vnitřní tělesné teploty pod 15 °C může dojít k úmrtí [5].
- *Udušení* je možné také v případě, že se zkapalněný vodík uvolní a vypaří v interiéru.



Obrázek 3. Naměřené hladiny hluku ze zapálených a nezapálených stacionárních kryogenních vodíkových proudů [9]

Friedrich a kol. [9] měřili hladinu hluku nezapálených a zapálených kryogenních proudů (průměr trysky 1 mm, tlak do 30 bar, hmotnostní průtok vodíku do 8 g/s, teplota 34–65 K). Pamatujte, že hladina hluku závisí na tlaku tryskání a hmotnostním průtoku. Čtyři různé měřiče pro vyhodnocení hladiny hluku byly instalovány ve vzdálenostech 1,23 m, 1,65 m, 2,91 m a 4,55 m od vypouštěcí trysky uvnitř zkušební komory [9]. Ustálené hladiny signálů hlukoměru jsou znázorněny na obrázku 3. „Zapálené proudy vytvářely o 10 dB (A) vyšší hladinu hluku než nezapálené proudy. Zdá se, že s rostoucím hmotnostním průtokem vodíku dochází k mírnému růstu hladiny hluku. Počáteční vyhoření zásob vodíku v nezreagovaném proudu způsobuje nejvyšší emise hluku“ [9].

Hladiny hluku naměřené v této studii (≤ 112 dB(A)) jsou považovány za nebezpečné pouze v případě trvalé nebo dlouhodobé expozice. Poškození sluchu krátkými zvukovými vlnami je

⁴ Účinek kapalného dusíku: <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

možné při 120 dB(A) a více. „Hladiny hluku nezapálených a zapálených kryogenních vodíkových proudů naměřené v této studii tedy nepředstavují žádné zdravotní riziko, a to ani v blízkých zkoumaných vzdálenostech (1,2–4,5 m). Na druhé straně jsou naměřené hladiny hluku dostatečně hlasité na to, aby umožnily včasnou identifikaci a lokalizaci volného vodíkového proudu nebo tryskového plamene pomocí hlukoměrů“ [9].

4. Škodlivé účinky spalování vodíku na člověka

Vdechnutí zplodin hoření běžných paliv je jednou z hlavních příčin zranění a hlavním důsledkem požáru. V případě vodíku je považován za méně závažný, protože jediným produktem hoření je vodní pára (netoxická, nejedovatá). Naproti tomu oxid uhelnatý CO může být smrtelný již při koncentracích těsně nad 400 ppm (částice na milion) [10]. Při sekundárních požárech však může vznikat kouř nebo jiné produkty hoření, které představují zdravotní riziko.

4.1 Vliv teploty vzduchu

Teplota plamene stechiometrické směsi vodíku se vzduchem je přibližně 2 403 K [11]. Při požáru vodíku se výrazně zahřívá okolní vzduch, což může mít vliv na osoby v okolí. Přímý kontakt s hořícím vodíkem nebo horkými plyny, které vznikají při hoření vodíku, způsobuje těžké *tepelné popáleniny*. Zvýšená teplota vzduchu může způsobit dýchací potíže nebo popálení dýchacích cest. Kolaps může způsobit i samotná vysoká teplota.

Tabulka 2. Vliv teploty vzduchu na člověka [12]

Teplota vzduchu, ve °C	Fyziologická reakce
70	Žádný fatální problém v uzavřeném prostoru kromě diskomfortu
115	Práh bolesti (doba expozice delší než 5 minut)
127	Ztížené dýchání
149	Ztížené dýchání ústy, teplotní limit pro únik
160	Rychlá, nesnesitelná bolest a suchá pokožka
182	Nezvratná poranění do 30 sekund
203	Doba tolerance dýchacích cest je kratší než čtyři minuty s vlhkou pokožkou
309	Popáleniny třetího stupně po 20 sekundách expozice, po několika minutách popáleniny hrtanu, únik není možný

Podle zprávy DNV (norská výzkumná organizace) z roku 2001 [12] jsou účinky zvýšení teploty vzduchu (pro zdánlivě klidnou atmosféru) klasifikovány takto:

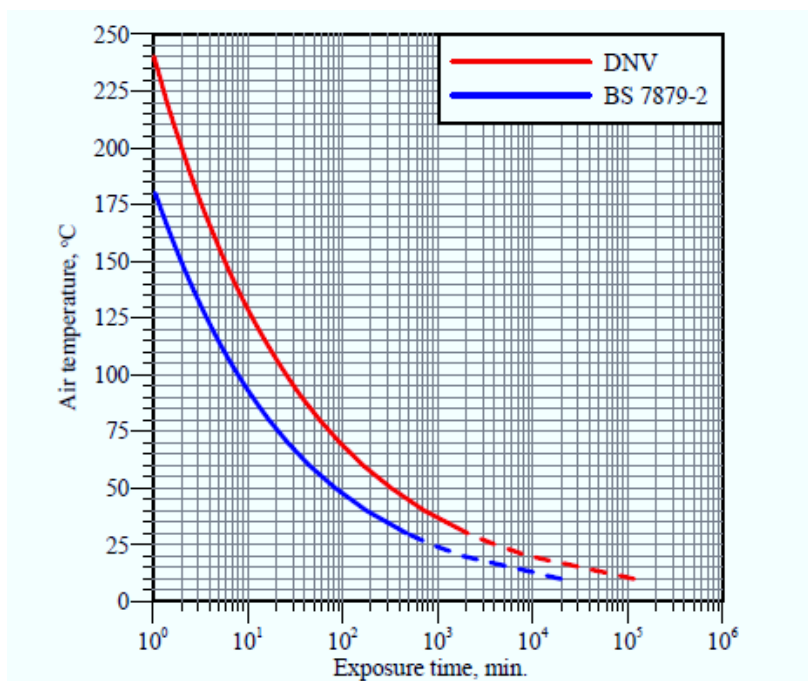
- při teplotě nižší než 70 °C nedochází v uzavřeném prostoru k úmrtí, pouze k diskomfortu,
- při teplotě v rozmezí 70 °C až 150 °C převládají u lidí dýchací potíže,
- stoupne-li teplota nad 150 °C, dojde k popálení kůže za méně než 5 minut.

Další podrobnosti o fyziologické reakci způsobené horkým vzduchem jsou uvedeny v tabulce 2.

Hodnota 149 °C je mezní teplotou pro únik. Například 115 °C je uvedeno jako práh bolesti v britských normách (BSI PD7974-6:2004) [13] pro expozice trvající déle než 5 minut. Kromě toho mohou být při posuzování doby do vzniku nezpůsobilosti (t_{inc} , min) v závislosti na teplotě vzduchu velmi užitečné dvě rovnice, které pocházejí z dokumentů [12] a [14]:

$$t_{inc} = 5.33 \times 10^8 \times T_{air}^{-3.66} \quad (1)$$

$$t_{inc} = 5 \times 10^7 \times T_{air}^{-3.4} \quad (2)$$



Obrázek 4. Doba do nástupu nezpůsobilosti (t_{inc}) jako funkce doby expozice podle dle [12] (červená čára) a [14] (modrá čára)

Obrázek 4 ukazuje dva grafy vynesené na základě výše uvedených rovnic (1) a (2) a aplikované na teplotní rozsah mezi 0 a 210 °C. Upozorňujeme, že čárkované části grafů při nižších teplotách by neměly být brány v úvahu. Rovnice založená na normě BS 7879-2 (modrý graf) poskytuje konzervativnější hodnoty na rozdíl od hodnot vypočítaných podle rovnice založené na přístupu DNV (červený graf). Porovnejme hodnoty uvedené v tabulce 2 s hodnotami na obrázku 4. Teplota 149 °C je mezní teplota, která znemožňuje evakuaci osob z objektu. Podle obrázku 4 se doba do nástupu nezpůsobilosti odpovídající této teplotě pohybuje mezi 2 minutami (modrý graf) a 5 minutami (červený graf). Pokud uvažujeme teplotu odpovídající práhu bolesti (115 °C), dochází k ní v rozmezí 5 minut (přístup dle normy BS 7879-2) až 15 minut (přístup DNV).

Akceptační kritéria pro teplotu horkého vzduchu: 70 °C – tolerovatelná hodnota pro veřejnost; 115 °C – tolerovatelná hodnota pro únik osob při době expozice 5 minut; 149 °C – maximální teplota vzduchu, která brání úniku přítomných osob. Má se za to, že členové záahových jednotek jsou vybaveni vhodnými osobními ochrannými prostředky, jako je dýchací přístroj,

který dokáže ochránit dýchací cesty proti účinkům vysokých teplot. Bylo zjištěno, že bezdotykové obleky mohou po krátkou dobu poskytovat ochranu před vzduchem zahřátým až na 1 093 °C [15].

4.2 Vliv přímého kontaktu s vodíkovým plamenem

Vliv vodíkového plamene na člověka je podobný jako u plamene jiných běžných paliv. Přímý kontakt s hořícím vodíkem nebo horkými plyny, které vznikají při hoření vodíku, způsobuje těžké popáleniny [11]. Studie o požárech uhlovodíkových paliv provedená v HSE (Health and Safety Executive) [16] stanovila různé typy požárů a jejich vliv na obyvatelstvo v závislosti na intenzitě, trvání a velikosti požáru (tabulka 3).

Tabulka 3. Charakteristika hlavních typů vodíkových požárů [16]

Typ požáru	Doba trvání požáru	Velikost požáru	Intenzita požáru	Dopad na osoby
Ohnivá koule	Velmi krátká	Velká	Velmi vysoká	Sálavé teplo, nízká pravděpodobnost úniku
Zášlehový požár	Velmi krátká	Velká	Střední	Pohlčení: smrtelné úrazy obvykle v ohnisku požáru, nízká pravděpodobnost úniku
Požár kaluže	Krátká	Střední	Nízká nebo střední	Sálání, pohlčení, vyšší pravděpodobnost úniku
Tryskový požár	Středně dlouhá nebo dlouhá	Střední	Vysoká	Sálání, přímý styk s plamenem, vyšší pravděpodobnost úniku

Údaje uvedené v tabulce 4 ukazují vliv věku osoby a popálené plochy kůže na pravděpodobnost úmrtí.

Tabulka 4. Popálená plocha kůže s 50% pravděpodobností úmrtí [16]

Věková skupina, roky	Plocha s popáleninami, %
0–4	60,0
5–34	71,2
35–49	61,8
50–59	52,1
60–74	33,7
Více než 75	19,6

Tabulka 5 dále uvádí odhad pravděpodobnosti úmrtí ve věkové skupině od 40 do 44 let v závislosti na procentuálním podílu popálené plochy těla. Je zřejmé, že vysoký počet osob umírá v důsledku rozsáhlých popálenin, které pokrývají velké procento povrchu těla.

Tabulka 5. Pravděpodobnost úmrtí v závislosti na popálené kůži pro věk 40–44 let [17]

Plocha těla s popáleninami, %	Pravděpodobnost úmrtí, %
78–100	100
68–77	90
63–67	80
53–62	70
48–52	60

43–47	40
33–42	30
28–32	20
18–27	10
0–17	0

4.3 Vliv sálavého tepelného toku z vodíkových požárů

Vodíkový plamen vyzařuje ve srovnání s uhlovodíkovým plamenem podstatně méně tepla a za denního světla je prakticky neviditelný. Maximální vlnová délka jeho emise je přibližně 311 nm, což je blízko ultrafialové (UV) části světelného spektra [11]. To znamená, že lidé v blízkosti vodíkového plamene nemusí vnímat jeho blízkost, dokud s ním nepřijdou do styku [11]. Bez vhodného detekčního zařízení je prvním pravděpodobným projevem malého plamene „syčivý“ zvuk plynu unikajícího otvorem a snad i mihotání vzduchu [11].

Pamatujte, že vodíkový plamen vyzařuje minimum infračerveného záření a prakticky žádné záření ve viditelné části spektra. Vzhledem k absenci pásem záření oxidu uhličitého CO₂ a silné absorpci okolní vodní párou je poměr viditelných (s pomocí speciální techniky nebo v nočních hodinách) a infračervených vodíkových tryskových plamenů 0,88 a poměr ultrafialové a infračervené délky plamene je 0,78 [18]. Konvekční a radiační tepelné toky jsou však i nadále důležitými parametry a musí být posuzovány z hlediska ochrany života, majetku a životního prostředí.

U osob, které nejsou v přímém styku s vodíkovými plameny, existuje možnost, že budou vystaveny vysokým tokům sálavého tepla po dobu dostatečnou pro vznik popálenin prvního, druhého i třetího stupně. Tabulka 6 obsahuje souhrn účinků různých úrovní sálavých toků na člověka, které lze použít jako kritéria škodlivosti [19].

Akceptační kritéria jsou definována takto:

- Tepelný tok 1,5 kW/m² je považován za bezpečný pro veřejnost (pro srovnání, 1,3 kW/m² je průměrná intenzita sálavého tepla ze slunce za horkého dne) [1].
- Některé normy obsahují návrh limitů pro vystavení nechráněné pokožky a tyto limity lze použít jako vodítko, např. britské normy [13] navrhuje tepelný tok 2,5 kW/m² jako limit pro vystavení nechráněné pokožky sálavému teplu, jehož překročení způsobí silnou bolest. Doba tolerance při této intenzitě je 5 minut [13]. Nicméně vystavení této intenzitě může vést k různým stupňům popálenin v závislosti na době vystavení. Tato intenzita je pro obyvatele snesitelná. Při překročení této hodnoty tepelného toku nebo délky expozice je třeba vypočítat obdrženu dávku, aby bylo možné vyhodnotit dopad na člověka [1].
- Tepelný tok 5 kW/m² je pro členy zásahových složek v ochranném oděvu mezní hodnotou snesitelnosti. Dlouhým expozicím této intenzity je však třeba předcházet.
- Intenzita 6 kW/m² je pro obyvatele při evakuaci přijatelná a měla by být považována za důležitou mezní hodnotu. Při této intenzitě je bolesti dosaženo do 12 s a smrtelná je přibližně za 38 s [1].

Tabulka 6. Vliv sálavého tepelného toku na člověka* [19]

Intenzita sálavého tepelného toku, kW/m ²	Účinky na člověka
1,5	Bez poškození zdraví; bezpečný pro širokou veřejnost i pro stálé zaměstnance
2,5	Intenzita snesitelná po dobu 5 minut; silná bolest nad tuto dobu expozice
3	Intenzita snesitelná pro méně časté nouzové situace po dobu 30 min
5	Bolest po 20 s expozice, popáleniny prvního stupně. Intenzita přijatelná pro osoby provádějící nouzové operace
6	Intenzita snesitelná pro evakuaci zaměstnanců přítomných v mimořádných situacích
9,5	Popáleniny druhého stupně po 20 sekundách
12,5–15	Popáleniny prvního stupně po 10 sekundách, 1 % úmrtí za 1 min
25	Významné poranění do 10 s, 100% úmrtí do 1 min
35–37,5	1 % úmrtí po 10 s

*Jedná se o obecné hodnoty pro požáry uhlovodíků

Prahové hodnoty se mohou být v různých zemích různé. Například podle francouzských pravidel jsou prahové hodnoty stanoveny na 3, 5 a 8 kW/m² [8]. V Příručce pro řešení mimořádných událostí týkajících se plynovodů – HP Natural Gas Action Card FPS Home Affairs (Belgie) se uvádí, že prahu bolesti je u nechráněné pokožky dosaženo po expozici tepelnému záření o intenzitě 3 kW/m² po dobu 10 s. Při zvýšení intenzity tepelného záření na 5 kW/m² se tato doba zkracuje na 5 s. Intenzita 10 kW/m² představuje nejvyšší mezní přijatelnou hodnotu pro nechráněné konstrukce [44]. Korelace mezi tepelnými toky a vzdálenostmi při hoření vodíku uniklého z potrubí v závislosti na průměru úniku a tlaku v zásobníku použitým ve francouzských pravidlech jsou uvedeny v příloze 1.

Míra poškození závisí nejen na intenzitě tepelného toku, ale také na době expozice. S ohledem na to se škodlivost sálavého tepla často vyjadřuje v jednotkách tepelné dávky, která v sobě spojuje intenzitu a délku expozice [19] podle rovnice (3):

$$\text{jednotka tepelné dávky: } TDU = I^{4/3} \times t \quad (3)$$

kde I je zářivý tok (v kW/m²) a t je doba expozice (v sekundách), 1 jednotka tepelné dávky (TDU) = 1 (kW/m²)^{4/3}s.

Pro členy zasahujících jednotek je zásadní znát škodlivost na základě dávky pro různé vlnové délky záření. Jak již bylo uvedeno dříve, vodíkový oheň vyzařuje více v UV než v IR části spektra. Tabulka 7 uvádí hodnoty jednotek tepelné dávky, které způsobují popáleniny 1., 2. a 3. stupně pouze v ultrafialovém (UV) a pouze v infračerveném (IR) spektru. Tepelný tok záření v infračerveném spektru je nejzávažnější pro vznik popálenin kůže, přičemž hodnota dávky je ve srovnání s UV zářením mnohem nižší. Prahové hodnoty uvedené v tabulce 7 ovlivňuje mnoho faktorů, včetně typu zdroje tepla a typu zvířecí kůže použité při pokusech [19].

Tabulka 7. Údaje o popálení záření [19]

Závažnost popálenin	Prahová tepelná dávka, $(\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$	
	Ultrafialový	Infračervený
První stupeň	260–440	80–130
Druhý stupeň	670–1 100	240–730
Třetí stupeň	1 220–3 100	870–2 640

Jako kritéria smrtelné újmy lze použít dva parametry: 1) „nebezpečná dávka“, která odpovídá úrovni dávky vedoucí k úmrtí 1 % exponované populace, a 2) smrtelná dávka „LD50“, která označuje dávku, při níž se očekává úmrtí 50 % osob. V literatuře byly uvedeny hodnoty nebezpečné dávky a LD50. Například Rew [16] navrhl 2 000 TDU jako ekvivalent LD50 pro tepelné záření na pevnině. Je třeba poznamenat, že hodnota LD50 $3\,600 (\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$, kterou uvádí Lees [24], se zdá být mnohem vyšší než 2 000 $(\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$ [16]. O'Sullivan a Jagger [20] a Chang et al. [21] tak uvádějí směrnou hodnotu 3 500 TDU odpovídající 100% úmrtnosti osob v oděvu. 100% úmrtnost se však může vyskytovat i u mírně nižších dávek. Při 3 500 TDU dojde k neřízenému zapálení oděvu, což naznačuje, že 100 % oblečených jedinců nepřežije. Při této úrovni tepelné dávky je samouhašení nepravděpodobné z důvodu poranění teplem přenášeným přes oděv. Výkonný orgán pro bezpečnost a ochranu zdraví (HSE) ve Spojeném království navrhl u ropných a plynových zařízení na moři použít $\text{LD50} = 2\,000 (\text{kW/m}^2)^{4/3}\text{s}$.

4.4 Účinky přetlaku na člověka

Úroveň přetlaku způsobené spalováním vodíku se značně liší a závisí na průběhu nehody. Nejméně nebezpečný je *zášlehový požár*, ke kterému dochází při rychlé spotřebě vodíku formou difúzního (nepremixovaného) spalování při jeho úniku (např. z prasklého potrubí, porušeného ventilu nebo přes vadné těsnění). Při zášlehových požárech, podobně jako při běžných požárech, nevznikají výrazné tlakové vlny a úroveň přetlaku je obvykle velmi nízká.

K *výbuchu mraku par* (VCE) dochází, když se uvolněný vodík smísí se vzduchem a vytvoří hořlavý mrak před zapálením. „Účinky přetlaku způsobené výbuchem mraku par se mohou značně lišit a závisí na rychlosti šíření plamene. Ve většině případů dochází k *deflagraci*, kdy čelo plamene postupuje podzvukovou rychlostí. Při detonaci čelo plamene postupuje nadzvukovou rychlostí a způsobuje výrazný přetlak“ [19].

Úroveň vytvářeného přetlaku se může v jednotlivých scénářích značně lišit a může být ovlivněna mnoha faktory, včetně hermetičnosti uzavření, turbulencí, přítomnosti překážek, objemu a koncentrace hořlavé směsi, rychlosti šíření plamene atd.

Úniky vodíku v uzavřených prostorech mají větší výbušný potenciál než úniky na volném prostranství. Opožděné zapálení vodíkového proudu nebo zapálení hořlavého mraku způsobí přetlak, který může způsobit škody na zdraví osob a majetku. V nejhorším případě, tj. v případě katastrofického protržení vodíkového zásobníku, vznikne *tlaková vlna* a *ohnivá koule*.

Účinky přetlaku na člověka mohou být přímé i nepřímé. Hlavním přímým účinkem je výrazné a náhlé zvýšení tlaku, které může způsobit poškození orgánů citlivých na tlak, jako jsou plíce a uši. Mezi nepřímé účinky se řadí dopady projektilů a úlomků spojené s poškozením zařízení, přemístění objektů, zřícení konstrukcí atd. Velké exploze mohou člověka odhodit na určitou vzdálenost [19]. Jelikož jsou unášivé síly dostatečně silné na to, aby strhly i velké předměty, může se i člověk sám stát projektilem. Vzniklá poranění se nazývají translační poranění, protože lidské tělo je doslova zvednuto a přemístěno. Závažnost poranění určuje rychlost, kterou je tělo přemístěno. 50 % osob, které se setkaly s přemístěním těla rychlostí nad 0,6 m/s, utrpí lehká zranění; 1 % osob s rychlostí okolo 4 m/s utrpí poranění, jakými jsou protržené orgány a zlomeniny kostí [1]. Škodu mohou způsobit dva faktory: *úroveň přetlaku* a doba trvání vysokého tlaku (*impuls*). Souhrn hodnot přetlaku pro přímé i nepřímé účinky, které mají za následek poškození zdraví člověka, je uveden v tabulkách 8 a 9.

Tabulka 8. Přímé účinky přetlaku na člověka [19]

Δp , kPa	Popis újmy
8	Žádná vážná poranění osob ve venkovním prostředí
10	Vážná poranění osob v interiéru, několik smrtelných poranění
13,8	Prahová hodnota pro protržení ušního bubínku
20	Práh přežití (20% pravděpodobnost úmrtí v interiéru; 0% pravděpodobnost úmrtí v exteriéru)
34,5–48,3	50% pravděpodobnost protržení ušního bubínku
54	Smrtelné poranění hlavy
68,9–103,4	90% pravděpodobnost protržení ušního bubínku
70	100% pravděpodobnost úmrtí v interiéru
82,7–103,4	Hranice pro krvácení do plic (těžké poranění nebo smrt)
137,9–172,4	50% pravděpodobnost úmrtí v důsledku krvácení do plic
206,8–241,3	90% pravděpodobnost úmrtí v důsledku krvácení do plic
48,3	Prahová hodnota pro vnitřní poranění výbuchem
482,6–1 379	Okamžité úmrtí

Jak je uvedeno v tabulce 8, přímými účinky jsou především krvácení do plic a protržení ušního bubínku v důsledku přetlaku. Je důležité si uvědomit, že poškození zdraví člověka způsobené výbuchem uvnitř budovy je ve srovnání se situací, kdy se lidé nacházejí na venkovním prostranství, významnější, a to v důsledku zesílení nepřímých účinků způsobených destrukcí budovy vedoucí ke vzniku projektilů (úlomků). Hladiny tlaku odpovídající přímému poranění člověka jsou totiž mnohem vyšší než u budov.

Tabulka 9. Nepřímé účinky přetlaku na člověka [19]

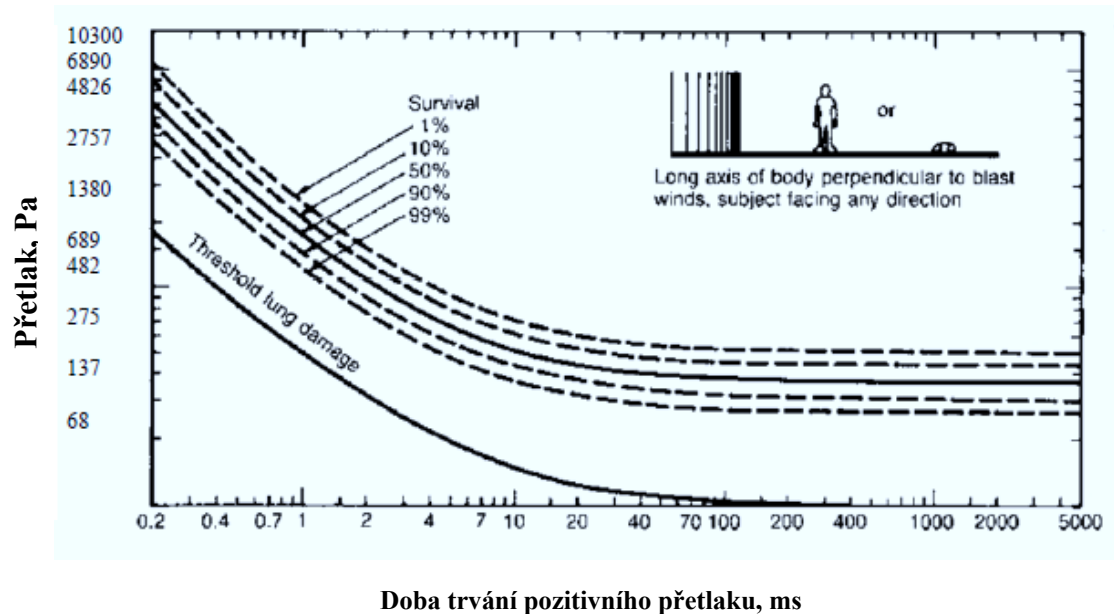
Δp , kPa	Popis újmy
3,0	Zranění střepy skla
6,9–13,8	Prahová hodnota pro poranění pokožky projektilem
10,3–20,0	Sražení člověka tlakovou vlnou
13,8	Možnost úmrtí při nárazu do překážky

27,6–34,5	50% pravděpodobnost úmrtí v důsledku poranění projektilem
48,3–68,9	100% pravděpodobnost úmrtí v důsledku poranění projektilem
55,2–110,3	Odhození stojícího člověka

U osob v interiéru, které se nacházejí u okna, může přetlak 3 kPa způsobit poranění střepy skla. Hraniční hodnotou pro vážná poranění je 10 kPa. U osob, které se nacházejí venku, nezpůsobí vážná poranění ani přetlak 8 kPa (tabulky 8 a 9). Hranice přežití je 21 kPa, ovšem jiné zdroje doporučují používat hodnoty z intervalu 14–20 kPa [8]. Prahová hodnota protržení ušního bubínku činí 13,8 kPa a rozmezí od 34,5 do 48,3 kPa odpovídá 50% pravděpodobnosti protržení bubínku s následky v podobě ztráty sluchu, tinitu a závratí. Tyto fyziologické účinky představují hrozbu pro osoby, které se budou snažit uniknout. Lidé budou dezorientovaní a nebudou schopni vzájemné komunikace. Pokud lidé trpí závratěmi, může být pro ně nebezpečné používat schody nebo únikové cesty. Zajímavé je, že z hlediska bezpečnosti jsou významnější nepřímé účinky. „Nepřímá poranění způsobená výbuchem převažují natolik, že osoby vystavené pouze přímým poraněním způsobeným výbuchem tvoří jen malou část pacientů“ [26]. Přímé účinky přetlaku nesahají tak daleko od místa výbuchu jako ostatní účinky a často jsou maskovány účinky unášivé síly [27]. Francouzská doporučení pro vzdálenosti od přetlakových událostí jsou uvedena v příloze 2.

Jedním z důležitých nepřímých účinků přetlaku jsou odletující střepiny (tzv. projektily). Závažnost poranění závisí na velikosti a hmotnosti úlomků a místě a rychlosti dopadu na lidské tělo [28]. Hlavním faktorem způsobujícím poranění je rychlost akcelerace projektilu. Pravděpodobnost průstřelu se zvyšuje s rostoucí rychlostí, zejména u projektilů malých rozměrů, jako jsou skleněné střepiny. Těžké projektily nemusí způsobit penetrační poranění, ale mohou vést k vážnějším poraněním, jako jsou zlomeniny [26]. Prahová rychlost pro zlomeniny lebky způsobené 4,5mg projektily činí pouhých 4,6 m/s [26]. Je však stále obtížné plně vyhodnotit důsledky působení projektilů na člověka, protože chybí řádně validované modely [1].

Doba trvání tlakové vlny, která vznikne při výbuchu, je velmi krátká (ve většině případů kratší než jedna sekunda) a osoby nacházející se v objektu by fyzicky nebyly schopny se uchýlit na bezpečné místo. Proto není možné vyhodnotit dobu expozice člověka tlakové vlně, protože taková událost proběhne takřka v jediném okamžiku. K posouzení škod však lze použít dobu trvání pozitivní fáze přetlaku. Například Lees [29] uvedl pravděpodobnost přežití a práh poškození plic tlakovou vlnou v závislosti na přetlaku (svislá osa) a délce trvání pozitivní fáze přetlaku (vodorovná osa), viz obrázek 5. Při konstantním tlaku je náraz tím silnější, čím delší je impuls.



Obrázek 5. Společný účinek přetlaku a impulsu [29]

Akceptační kritéria pro hodnoty přetlaku jsou uvedena níže. Tyto hodnoty je třeba považovat za pouhé doporučení.

- Pro osoby, které se nacházejí uvnitř budovy, představuje přetlak 1 kPa přijatelnou hodnotu. Tato úroveň odpovídá rozbití 5 % okenních tabulí [30].
- Přetlak 1,35 kPa a impulsy 1 Pa za sekundu lze považovat za mezní hodnotu, při které nedochází k poškození zdraví člověka [31].
- Pro osoby, které se nacházejí vně budovy, představuje přetlak 8 kPa přijatelnou hodnotu.
- Pro osoby, které se nacházejí uvnitř budovy, představuje maximální hodnotu přetlak 10 kPa. Při překročení této hranice hrozí vážná poranění a smrtelné úrazy [1].
- Hodnota přetlaku 21 kPa představuje hodnotu přežití pro osoby, které se nacházejí vně budov. Tento práh neomezuje pohyb a je u něj nízká pravděpodobnost poranění nebo úmrtí.
- Přetlak 21 kPa je mezní hodnotou přežití i pro členy zásahových jednotek, protože jejich osobní ochranné prostředky je před účinky přetlaku neochrání.
- Hodnota přetlaku 34 kPa představuje maximální hodnotu pro osoby, které se nacházejí vně budov. Přetlak vyšší než 34 kPa má fyziologický dopad na evakuované osoby. Tato hodnota je konzervativní s ohledem na 1% pravděpodobnost úmrtí a 1% pravděpodobnost úmrtí primárně v důsledku krvácení do plic (99 kPa) dle [29].

5. Škody na konstrukcích, vybavení a životním prostředí způsobené vodíkovým požárem

Kritéria poškození konstrukcí, vybavení a škod na životním prostředí způsobená vodíkovým požárem lze vyjádřit z hlediska vystavení sálavému tepelnému toku nebo přímému působení

plamenů. Dopady intenzity sálavého tepelného toku na konstrukce, zařízení a životní prostředí jsou souhrnně uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10. Vliv sálavého tepelného toku na konstrukce, vybavení a životní prostředí [19, 29]

Sálavý tepelný tok, kW/m ²	Vliv na konstrukce, materiály, vybavení a životní prostředí
4	Rozbití skla (expozice 30 min)
5	Rozbití významného podílu oken
8–12	Prahová intenzita tepelného toku schopná vyvolat dominový efekt
10	Zahřívání konstrukcí; zvýšení teploty a tlaku v zásobnících LH ₂ /GH ₂
10–12	Zapálení vegetace
10 nebo 20	Zapálení paliva, oleje (120, resp. 40 s)
12,5–15	Přímé zapálení dřeva; tavení plastů (expozice >30 min)
16	Porušení konstrukcí (s výjimkou betonu) při dlouhodobé expozici
18–20	Degradace izolace kabeláží (expozice >30 min)
20	Intenzita, které dokáží betonové konstrukce odolat i po několik hodin
25–32	Nepřímé zapálení dřeva; deformace oceli (expozice >30 min)
35–37,5	Poškození technologického zařízení a konstrukcí, včetně skladovacích zásobníků (expozice >30 min)
100	Zřícení ocelových konstrukcí (expozice >30 min)
200	Narušení betonových konstrukcí (v řádu několika desítek minut)

Akceptační kritéria jsou uvedena níže:

- 5 kW/m² – mezní hodnota pro mírné škody; tato intenzita odpovídá rozbití okenních tabulí.
- 10 kW/m² – mezní hodnota pro středně vysoké škody; tato intenzita odpovídá úrovni tepelného toku, která vede k zahřívání konstrukcí a k výraznému zvýšení tlaku uvnitř zásobníků na kapaliny a plyny.
- 10 kW/m² – je prahová hodnota pro citlivou oblast.
- Prahové hodnoty zhroucení konstrukcí silně závisejí na povaze materiálu: ke zhroucení nebetonových konstrukcí dochází při dlouhodobé expozici tepelnému toku 16 kW/m², zatímco betonové konstrukce selhávají při tepelném toku 200 kW/m².

6. Vliv přetlaku na konstrukce a zařízení

Hodnoty přetlaku mohou členům zásahových jednotek poskytnout vodítko ohledně stupně destrukce. K drobným poškozením konstrukce dochází při přetlaku přibližně 3–6 kPa, zatímco k úplné demolici dochází při přetlaku v rozmezí 80–260 kPa.

Prahové hodnoty budov, jak tyto hodnoty navrhl Mannan, [32] jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11. Prahové hodnoty přetlaku pro poškození budov podle Mannana [32]

Přetlak, kPa	Stupeň poškození
4,8	Mírné poškození budovy
6,9	Částečná demolice budovy – budova je neobyvatelná
34,5–48,3	Takřka úplné zničení budovy

Tyto hodnoty před nedávnem upravili Molkov a Kashkarov [33] pro účely posouzení separačních vzdáleností od tlakové vlny vzniklé při roztržení vysokotlakého zásobníku vodíku. Podrobnosti o této metodice jsou uvedeny v přednášce Detonace a deflagrace vodíku.

Tabulka 12 obsahuje různé účinky přetlaku na konstrukce, jak je uvádí odborná literatura [29, 30]. Okenní skla jsou náchylná k rozbití obzvláště při nízkém přetlaku [1]. Nezapomeňte, že úlomky skla se mohou stát projektily a přivodit člověku poranění.

Tabulka 13. Reakce konstrukčních prvků na různé úrovně přetlaku

Prvky	Přetlak, kPa	Popis újmy
Okenní tabule	0,7–1,0	5 % rozbitých
	1,4–3,0	50 % rozbitých
	3,0–6,0	90 % rozbitých
Budova	1,4–3,0	Obyvatelná po opravě škod na stropech, oknech a obkladech
	3,0–6,0	Omezené drobné poškození konstrukce. Příčky a tesařské výrobky vylomeny z ukotvení. Poškození stropu budovy. 90 % rozbitých okenních výplní
	6,0–9,0	Rozbité rámy dveří a oken
	9,0	Mírná deformace ocelového rámu opláštěných budov
	14–28	Neobyvatelná; částečné nebo úplné zřícení střechy, částečná demolice jedné nebo dvou vnějších stěn, vážné poškození nosných příček. Roztříštění nevyztužených betonových stěn a stěn ze škvárbetonových tvárníc
	30	Zničení všech budov, které nebyly navrženy s odolností proti výbuchu
	35–80	Zničení nebo prohlášení za nebezpečné 50–75 % obvodového zdiva
	80–260	Takřka úplná demolice
	50–100	Přemístění válcového zásobníku, porucha potrubí

Stephen [34] a Lees [29] uvádějí špičkové hodnoty přetlaku a míru poškození konstrukcí, které jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13. Klasifikace poškození konstrukcí při různém přetlaku

Přetlak, kPa	Úroveň poškození
méně než 3,5	Lehké škody
více než 17	Mírné škody
více než 35	Závažné poškození
více než 83	Úplné zničení

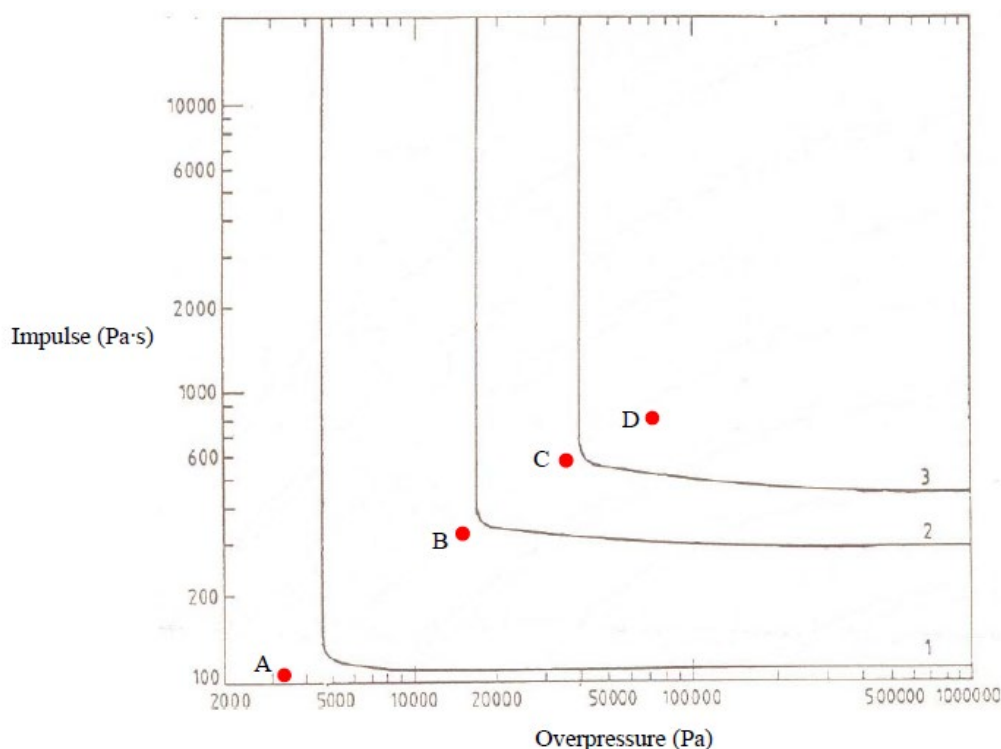
Ve Francii existují pokyny pro kritéria následků pro stanovení tzv. domino vztahu (např. 8 kW m⁻² pro tepelné záření, 200 mbar pro přetlak) [43]. Jak jsme zmínili výše, prahové hodnoty

závisejí na vnitrostátních předpisech. Příklady francouzských prahových hodnot spojených s účinky přetlaku na člověka a konstrukce jsou uvedeny v příloze 3.

Společný vliv přetlaku a impulsu je uveden v tabulce 15 a na obrázku 6. Tyto hodnoty lze použít jako prahové hodnoty. Hodnoty přetlaku a impulsu odpovídající bodům A, B, C a D v tabulce 14 jsou rovněž znázorněny na obrázku 6 a jsou ve shodě s úrovní poškození 1, 2 a 3 (viz legendu k obrázku 6). Obrázek 6 lze použít k odhadu míry poškození budov při konkrétním špičkovém přetlaku a impulsu výbuchu.

Tabulka 14. Společný vliv přetlaku a impulsu na úroveň poškození [1]

Špičkový přetlak, kPa	Impuls, kPa·s	Popis újmy	Bod na obrázku 12
3,6	0,10	Hranice drobných poškození konstrukce	A
14,6	0,30	Hranice středně závažných poškození konstrukce: selhání některých nosných prvků	B
34,5	0,52	Prahová hodnota pro částečnou distrakci: 50–75 % zničených stěn	C
70,1	0,77	Úplné zničení budov	D



Obrázek 6. Diagram přetlaku a impulsu při dopadu vysoce výbušné nálože na zem s postupným poškozením budov: 1. stupeň – lehké poškození; 2. stupeň – poškození konstrukce; 3. stupeň – zřícení [35]

Akceptační kritéria jsou následující:



- Prahová hodnota pro lehké poškození je tlak 3 kPa s impulsem větším než 100 Pa·s. Při této úrovni přetlaku je infrastruktura po opravě poškození stropů, oken a obkladů obyvatelná.
- Prahová hodnota pro středně závažné poškození je tlak 15 kPa s impulsem větším než 300 Pa·s.
- Prahová hodnota pro zhroucení stavebních konstrukcí je 35 kPa s impulsem větším než 500 Pa·s.
- Prahová hodnota pro citlivou oblast je 20 kPa.

Příklady nehod vodíkových systémů, u kterých došlo k poškození konstrukce a k úmrtí osob:

- Výbuch 15tunové nádrže s vodíkem v chemickém závodě, 1953. Nagoja, Japonsko. 16 osob bylo zemřelo a 230 bylo vážně zraněno. Další podrobnosti naleznete na tomto odkazu: <https://www.youtube.com/watch?v=eGAfBi6KyMw>
- Požár a výbuch vodíku ve velkém petrochemickém komplexu. 1984; Polysar Ltd, Sarnia, Kanada. Únik přibližně 30 kg plynného vodíku do kompresorovny z prasklé příruby pracující při tlaku 4 800 kPa. 2 mrtví a 2 zranění. V blízkém okolí bylo pozorováno rozsáhlé velké poškození konstrukce; sklo a menší poškození konstrukce – až do vzdálenosti 1 km.
- Výbuch vodíku na pátém nadkritickém bloku uhelné elektrárny Muskingum River o výkonu 585 MW, 2007. Ohio, USA. K výbuchu došlo při rutinní dodávce vodíku, kdy selhalo odlehčovací zařízení; obsah vodíkové nádrže unikl a zapálil se od neznámého zdroje. 1 osoba zemřela a 10 bylo zraněno, na několika budovách vznikly značné škody. Další podrobnosti naleznete na tomto odkazu: <http://www.powermag.com/lessons-learned-from-a-hydrogen-explosion/>

7. Souhrn kritérií přijatelnosti pro život a majetek

Tabulka 15 shrnuje dříve diskutované prahové hodnoty (tj. akceptační kritéria pro bezpečnost života a ztráty na majetku). Měly by se používat spíše jako vodítko než jako absolutní číselné hodnoty.

Tabulka 15. Hodnoty pro definici kritérií přijatelnosti pro bezpečnost života a ztráty na majetku

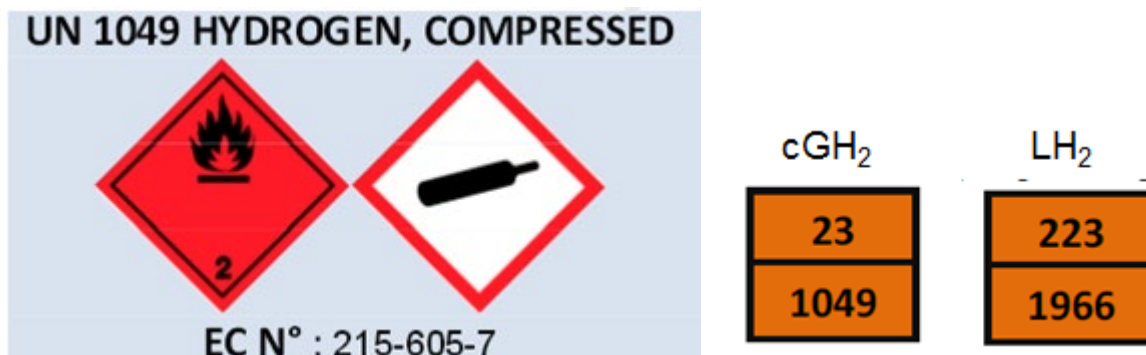
Umístění	Ohrožení života	Prahová hodnota	První záchranná složka	Obyvatel	Veřejnost
Vnitřní a venkovní prostory	Koncentrace vodíku, obj. %	Snesitelné	9	28	9
		Maximální	-	40	-
	Teplota vzduchu, ve °C	Snesitelné	149	115	70
		Maximální	-	149	-
	Přímý sálavý tepelný tok, kW/m ²	Snesitelné	5	2,5	1,5
		Maximální	-	6	-

Přímý přetlak, kPa	Snesitelné	8	21	8
	Maximální	-	34	-
Nepřímý přetlak – projektily z oken, kPa	Snesitelné	1	1	1
	Maximální	-	10	-

Ohrožení majetku	Prahová hodnota	Hodnoty
Sálavý tepelný tok, kW/m ²	Lehké škody	3
	Mírné škody	10
	Citlivá oblast	10
	Kolaps	16–200
Přetlak, kPa	Lehké škody	6
	Mírné škody	15
	Citlivá oblast	20
	Kolaps	35

8. Označování vodíkových systémů

Piktogramy pro komerční přepravu vodíku jsou uvedeny na [obrázku 7](#), kde „1049“ označuje plynný vodík a „1966“ označuje kapalný vodík [36].



Obrázek 7. Příklady piktogramů používaných pro přepravu vodíku.

Nařízení EU č. 406/2010 doporučuje u vozidel na FC používat zelené kosočtverce v bílých rámečcích s nápisem „H₂ GAS“ nebo „LIQUID H₂“ v bílém provedení [37]. Jednotné značení v EU iniciovala organizace CTIF (Mezinárodní asociace požární a záchranných služeb) a Komise pro vyprošťování a nové technologie) [38]. Je důležité si uvědomit, že ačkoli pokyny existují, nejsou právně závazné a jejich dodržování je dobrovolné. Norma ISO 17840-4: Identifikace pohonné energie definuje značky a relativní barvy pro označení paliva a/nebo energie použité k pohonu silničního vozidla, zejména pro případ nové technologie vozidla a/nebo zdrojů energie, včetně hybridních pohonů (viz obrázek 8). Sdělení o pohonné energii a souvisejících nebezpečích je provedeno logickým a modulárním způsobem, který usnadňuje jeho pochopení. Tento dokument platí pro osobní automobily, autobusy, autokary, lehká a těžká užitková vozidla podle normy ISO 3833. Tento dokument se nevztahuje na paliva, která

jsou součástí nákladu nákladních vozidel. Použití štítku zahrnuje mimo jiné záchranný list (ISO 17840-1 a ISO 17840-2 a příručku pro případ nouze ISO 17840-3).

Hlavní kroky při vývoji symbolů pro formální určení nebezpečnosti jsou uvedeny na [obrázcích 8 a 9](#). Tyto barvy se používají také v informacích o záchranných akcích a pro barevné provedení součástí vozidla (záchranné listy).

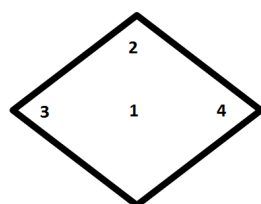
GREY	DIESEL
RED	GASOLINE
GREEN	GAS
WHITE	CRYOGEN LNG
BLUE	HYDROGEN
ORANGE	HIGH VOLTAGE

SYMBOLS

- 1) FIRST ENERGY SOURCE: CNG LNG LPG
- 2) SECOND ENERGY SOURCE:
- 3) DENSITY COMPARED TO AIR:
- 4) STORED AGGREGATE STATE:



Obrázek 8. Barvy a symboly navržené CTIF pro vývoj standardizovaných značek



1	First energy source
2	Second energy source
3	Density compared to air
4	Stored aggregate state

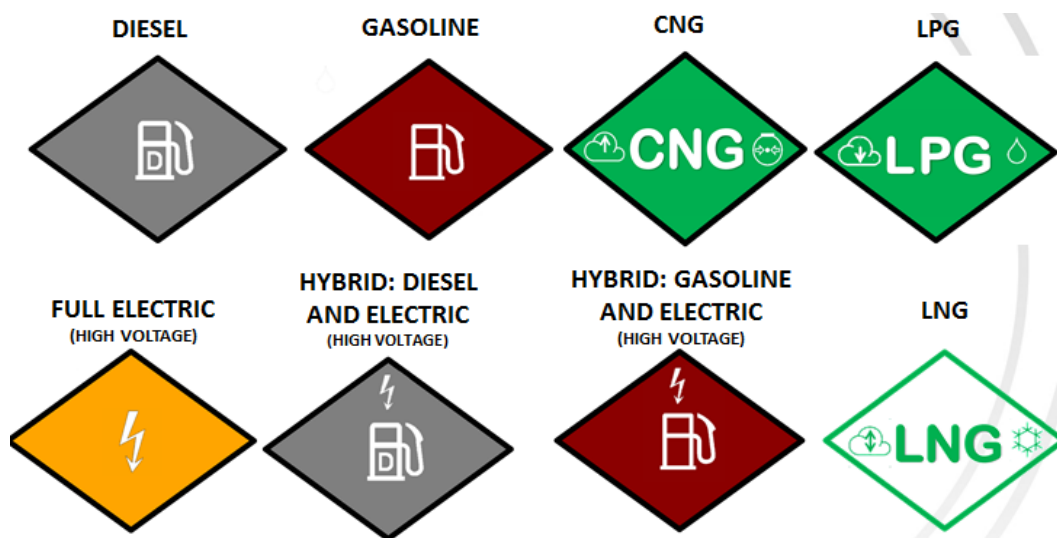
Obrázek 9. Kosočtverec navržený CTIF pro identifikaci nebezpečí ve vozidle [38]

Obrázek 10 obsahuje nejnovější verzi štítku pro FC vozidlo, na kterém jsou uvedeny dva hlavní zdroje energie: vodík (uprostřed) a elektřina v horním rohu. Symbol v levém rohu označuje, že první zdroj energie (tj. vodík) je lehčí než vzduch; symbol v pravém rohu označuje, že se jedná o stlačený plyn. Norma ISO 17840-4 poskytuje členům záchranných jednotek cenné informace o nebezpečí, které je viditelné na velkou vzdálenost.



Obrázek 10. Symbol vyvinutý společností CTIF pro vozidlo s FC poháněné stlačeným plynným vodíkem [38]

Příklady symbolů navržených CTIF pro jiné typy vozidel, tradiční a hybridní, jsou uvedeny na obrázku 11.



Obrázek 11. Symboly vyvinuté CTIF pro různé druhy paliv/energií pro vozidla [38]



Obrázek 12. Formální identifikace metod používaná v USA [36]

Pamatujte prosím, že v USA jsou pracovníci záchranných složek odkázáni na asociaci NFPA, která vydává pokyny k používání „FORMÁLNÍCH“ a „NEFORMÁLNÍCH“ způsobů identifikace vozidel [36]. Jedním z formálních identifikátorů *obtisky* a grafika na mnoha vozidlech a autobusech. Obsahují nápisy „FCEV“ a „FC“, což jsou zkratky výrazů „Fuel Cell“ (palivový článek), resp. „Hydrogen Fuel Cell“ (vodíkový palivový článek). Čím více se však blížíme ke komerčnímu využití, tím méně často se značení používá. Například Honda FCX Clarity pronajímána řidičům v jižní Kalifornii není těmito obtisky vybavena. Přesto je však vybavena *označením* modelu vozidla vedle znaku výrobce jako každé jiné vozidlo (obrázek 12). Tento postup je v souladu s mezinárodní normou SAE [36].

9. Osobní ochranné prostředky

V souvislosti s požadavky na vlastnosti hasičských osobních ochranných prostředků je třeba zmínit dvě hlavní normy EU. Norma (NF) EN 469:2006-02 [39] obsahuje požadavky na ochranný oděv pro hasiče a norma (NF) EN 136:1998 [40] požadavky na ochranu dýchacích cest. Dle požadavků na tepelnou odolnost (NF) EN 469:2006-02 se materiál použitý k zhotovení oděvů při zkoušce za teploty $180 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu expozice 5 minut nesmí vznítit ani roztavit a nesmí se smrštit o více než 5 % ve směru stroje ani v příčném směru [39]. Upozorňujeme, že dopadající tepelný tok je omezen na jmenovitou hodnotu 80 kW/m^2 .

Výsledky zkoušek se vyjadřují jako index prostupu tepla (HTI_{24}) – doba (v sekundách, s), za kterou se teplota v kalorimetru zvýší na $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro klasifikaci hasičských oděvů se zaznamenává také doba (v s) odpovídající zvýšení teploty na $12 \text{ }^\circ\text{C}$ (HTI_{12}). Reakce materiálu na prostup tepla (plamen) musí dosahovat níže uvedené úrovně [39].

Level 1	Level 2
$\text{HTI}_{24} \geq 9.0$	$\text{HTI}_{24} \geq 13.0$
$\text{HTI}_{24} - \text{HTI}_{12} \geq 3.0$	$\text{HTI}_{24} - \text{HTI}_{12} \geq 4.0$

Hustota tepelného toku 40 kW/m^2 se používá k měření odolnosti materiálu vůči sálavému teplu. Měří se indexy prostupu sálavého tepla (RHTI). Požadavky normy EN 469:2006 jsou uvedeny níže:

Level 1	Level 2
$\text{RHTI}_{24} \geq 10.0$	$\text{RHTI}_{24} \geq 18.0$
$\text{RHTI}_{24} - \text{RHTI}_{12} \geq 3.0$	$\text{RHTI}_{24} - \text{RHTI}_{12} \geq 4.0$

Zbytková pevnost materiálu vystaveného sálavému teplu 10 kW/m^2 by měla činit $\geq 450 \text{ N}$ [39]. Pracovníci vykonávající činnost ve vodíkovém zařízení nebo systému mohou snížit možné následky nebezpečí použitím vhodných ochranných prostředků. Některé z podmínek, při nichž by měl být personál chráněn, zahrnují vystavení kryogenním teplotám, teplotám plamene, tepelnému záření z vodíkového plamene a atmosféře s nedostatkem kyslíku ve vodíku nebo



inertních čisticích plynech, jako jsou dusík a helium. Druh použitých OOP určuje povaha práce. Některé obecné pokyny pro osobní ochranné prostředky jsou uvedeny v normě ISO 15196 [11]. Tyto pokyny však nezahrnují osobní ochranné prostředky, které by měly být zohledněny při jiných činnostech, jako jsou práce na elektrických obvodech nebo provádění čištění či dekontaminace [11]. Nezbytné nebo povinné součásti osobních ochranných pracovních prostředků je třeba zvolit na základě podmínek panujících na pracovišti.

- Je-li to vhodné, měla by se používat ochrana zraku (např. při připojování a odpojování vedení nebo součástí by se měl používat úplný obličejový štít, při manipulaci s LH₂ ochranné brýle).
- Při manipulaci s jakýmkoli předmětem, který přichází do styku s LH₂ nebo studeným GH₂, je třeba používat řádně izolované rukavice. Rukavice by měly být volné, snadno sundavatelné a neměly by mít velké manžety.
- Měly by se používat kalhoty s dlouhými nohavicemi, nejlépe bez manžet. Nohavice by měly přesahovat boty nebo pracovní obuv.
- Obuv by měla být uzavřená (otevřená nebo porézní obuv by se neměla vůbec používat).
- Je třeba nosit oděv z běžné bavlny, nehořlavé bavlny nebo antistatického materiálu. Vyvarujte se nošení oděvů z nylonu nebo jiných syntetických materiálů, hedvábí nebo vlny, protože tyto materiály mohou vytvářet elektrostatické náboje, které mohou zapálit hořlavé směsi. Syntetický materiál (oděv) se může roztavit a přilepit k tělu, a způsobit tak závažnější popáleniny. Oděv postříkaný nebo politý vodíkem je třeba vysvléci. Následně se nesmí použít, dokud z něj není zcela odstraněn plynný vodík.
- Nepoužívejte rukavice, přiléhavé oděvy a oděvy, které zadržují nebo zachycují (kapsy) kapalinu u těla.
- Pokud vodíkové zařízení nebo systém obsahuje i zařízení, které vytváří hlasitý hluk, je třeba používat ochranu sluchu.
- Pokud je vodíkové zařízení nebo systém spojen s nebezpečím pádu předmětů, je třeba nosit ochrannou čepici nebo přilbu.
- Při práci v uzavřeném prostoru s možností nedostatku kyslíku je třeba používat autonomní dýchací přístroj.
- K varování před únikem vodíku a požárem by se mělo používat přenosné zařízení k detekci vodíku a požáru.
- Hasiči by měli používat termokamery a bezobslužné hadice nebo otočné proudnice.
- Existuje-li podezření, že se v oblasti vodíkového systému nachází vodík, měli by se pracovníci před dotykem nebo použitím náradí řádně uzemnit.

10. Vlivy na životní prostředí

Vodík nekontaminuje podzemní vody (za běžných atmosférických podmínek je vodík plyn) a jeho únik nepřispívá ani ke znečištění ovzduší. Vodík se v pozemské atmosféře vyskytuje v koncentraci 0,5 ppm (počet částic na milion) od terénu až do výšky 60 km [1]. Mezi zdroje emisí vodíku popsané Schultzem [41] patří:

- nedokonalé spalování fosilních paliv a biomasy (40 %),
- atmosférická petrochemická oxidace methanu a nemethanových uhlovodíků (50 %),
- emise ze sopek, oceánů a dusík vázajících luštěnin (10 %).

75 % emisí vodíku je z atmosféry odstraněno suchou depozicí do půdy, zbývajících 25 % je odstraněno oxidací v atmosféře [41].

Vodík při svém použití jako palivo nevytváří „výpary“ ani „kouř“. Vozidlo s FC má nulové emise ve výfukovém potrubí [42].

Poděkování

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

Literatura a odkazy

1. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering (Zásady vodíkového bezpečnostního inženýrství). Disertační práce. Ulsterská univerzita.
2. NFPA (2009). Kodex pro bezpečnost života.
3. Hammer, W (1989). Řízení a technologie bezpečnosti práce, 4. vydání, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, kapitola 19.
4. NASA (1997). Bezpečnostní norma pro vodík a vodíkové systémy. Pokyny pro konstrukci vodíkových systémů, výběr materiálů, provoz, skladování a přepravu. Technická zpráva NSS 1740.16, Úřad pro bezpečnost a zajištění misí, Washington.
5. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: www.bookboon.com, e-kniha k bezplatnému stažení
6. Prasher, D (2000). Noise Pollution Health Effects Reduction (Snížení zdravotních účinků hluku (NOPHER): An European Commission Concerted Action Workplan (Společný akční pracovní plán Evropské komise). Noise Health (Hluk a zdraví), číslo 2, s. 79–84. K dispozici na adrese: <http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2000/2/8/79/31748> [přístup k datu 09.11.2020].
7. Hydrogen Detection in Oil Refineries (Detekce vodíku v ropných rafineriích). Gassonic. Společnost skupiny General Monitors.
8. NIO Note D'Information Operationnelle (2013). 'Intervention sur les installations d'hydrogène et Les risques lies (Zásahy do vodíkových zařízení a související rizika). Ve francouzštině a angličtině. K dispozici na adrese:

[http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/\(mode\)/full/\(page\)/14](http://pnrs.ensosp.fr/Plateformes/Operationnel/Actualites/LA-NOTE-D-INFORMATION-OPERATIONNELLE-N.I.O.-SUR-LE-RISQUE-HYDROGENE-GENESE-INTERET/(mode)/full/(page)/14) K dispozici ke stažení na adrese: http://pnrs.ensosp.fr/content/download/32685/550103/file/ENSOSP-PNRS_LA%20NIO%20SUR%20LE%20RISQUE%20HYDROGENE.pdf [přístup k datu 25.11.2020].

9. Friedrich, A. a kol. (2012). Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets (Zapálení a tepelné záření proudů kryogenního vodíku). Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 31, s. 17589–17598.
10. Drysdale, D (1985). An introduction to fire dynamics (Úvod do dynamiky požárů). John Wiley and Sons, Chichester, s. 146
11. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
12. DNV Technica (2001). Human resistance against thermal effects, explosion effects, toxic effects and obscuration of vision (Odolnost člověka proti tepelným účinkům, účinkům výbuchu, toxickým účinkům a omezení zrakových funkcí). DNV Technica, Scandpower A/S, Det Norske Veritas, Oslo, Norsko.
13. BSI British Standards Institution (2004). Zveřejněný dokument PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings - Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupants evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6) (Uplatnění zásad požárně bezpečnostního inženýrství při projektování požární bezpečnosti staveb – Část 6: Lidský faktor: Evakuace, chování a stav obyvatel (Podsystém 6)).
14. BSI British Standards Institution (1997). Britská norma 7899:1997. Code of practice for assessment of hazard to life and health from fire (Kodex pro posuzování ohrožení života a zdraví v důsledku požáru). Guidance on methods for the quantification of hazards to life and health and estimation of time to incapacitation and death in fires (Pokyny k metodám kvantifikace nebezpečí pro život a zdraví a odhadu doby k dosažení nezpůsobilosti a smrti při požárech).
15. National Fire Protection Association NFPA, Recommended practice for Responding to Hazardous Materials Incidents (Národní asociace požární ochrany NFPA, Doporučený postup pro reakci na nehody s nebezpečnými materiály) (1997).
16. Rew, P. (1997) LD50 equivalent for the effects of thermal radiation on humans (Ekvivalent LD50 pro účinky tepelného záření na člověka): Suffolk, Health and Safety Executive (HSE) Books.
17. Bull, JP (1971). Revidovaná analýza úmrtnosti v důsledku popálenin. THE LANCET, sv. 298, vydání 7734: s. 1133–1134.
18. Houf, WG a Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen (Předpovídání vyzařovaných tepelných toků a hořlavých obálek při neúmyslném uvolňování vodíku). Mezinárodní časopis o

- energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32, s. 136–151.
19. LaChance, J, Tchouvelev, A a Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure (Vývoj jednotných kritérií škodlivosti pro použití v kvantitativní analýze rizik vodíkové infrastruktury). Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36 s. 2381–2388.
 20. O'Sullivan, S and Jagger, S. (2004) Human vulnerability to thermal radiation offshore (Zranitelnost člověka při působení tepelného záření na moři), S. Jagger(Ed.), Health&Safety Laboratory, Buxton.
 21. Chang, Y a kol. (2008). The Study of Flame Engulfment Protection of Firefighter's Clothing (Studie ochrany proti pohlcení hasičských ochranných oděvů požárem), J. HanaokaTextile, sv. 15, 345–349.
 22. Eisenberg, NA, et al. (1975). Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills (Model zranitelnosti: simulační systém pro hodnocení škod způsobených únikem z moře), závěrečná zpráva SA/A-015 245, Pobřežní stráž USA.
 23. Tsao, CK a Perry, WW (1979). Modifications to the vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills (Modifikace modelu zranitelnosti: simulační systém pro posuzování škod způsobených únikem do moře). Zpráva ADA 075 231, Pobřežní stráž USA.
 24. Lees, FP (1994). The assessment of major hazards: a model for fatal injury from burns (Hodnocení závažných rizik: model pro smrtelná poranění způsobená popáleninami). Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Svazek 72 (část B), s. 127–134.
 25. Methods for the determination of possible damage (Metody pro stanovení možného poškození). Uvedeno v: CPR 16E. Nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum; 1989.
 26. NATO (1993). Field manual, health service support in a nuclear, biological, and chemical environment (Terénní příručka, podpora zdravotnických služeb v jaderném, biologickém a chemickém prostředí). Fm 8-10-7 Headquarters, Department of Army, Washington DC.
 27. Health and Safety Executive (2006). Indicative human vulnerability to the hazardous agents present offshore for application in risk assessment of major accidents (Indikativní zranitelnost člověka vůči nebezpečným činitelům přítomným na moři pro použití při posuzování rizik závažných havárií). SPC/Tech/OSD/30.
 28. Okabayashi, K, Hirashima, H, Nonaka, T, Takeno, K, Chitose, K a Hashiguchi, K (2007). Introduction of Technology for Assessment on Hydrogen Safety (Zavedení technologie pro posuzování vodíkové bezpečnosti). Mitsubishi Heavy Industries Ltd., technický přehled. Svazek 44(1), s. 1–3.
 29. Lees, FP (2004). Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu), 3. vydání – Určení, posuzování a řízení nebezpečnosti. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
 30. Scilly, NF a High, WG (1986). The blast effects of explosions (Tlakové účinky výbuchů). Sborník z 5. mezinárodního sympozia o prevenci ztrát a podpoře bezpečnosti ve zpracovatelském průmyslu. 39-1-39-15.

31. Baker, WE a kol. (1983). Explosion hazards and evaluation (Nebezpečí výbuchu a jeho hodnocení). Elsevier Scientific Publishing Company.
32. Mannan, S (2005). Časopis Loss Prevention in the Process Industries (Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu), 3. vydání, sv. 1. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
33. Molkov, V a Kashkarov, S (2015). Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks (Tlaková vlna z protržení vysokotlaké plynové nádrže při požáru: samostatné a podvozkové vodíkové nádrže). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 40, s. 12581–12603.
34. Stephens, MM (1970). Minimising damages to refineries from nuclear attack (Minimalizace škod na rafineriích způsobených jaderným útokem). Natural and other disasters (Přírodní a jiné katastrofy). Office of oil and gas (Úřad pro ropu a zemní plyn). Ministerstvo vnitra.
35. Mercx, WPM, Weerheijm, J, Verhagen, TLA (1991). Some considerations on the damage criteria and safety distances for industrial explosions (Vybraná hlediska kritérií poškození a bezpečnostních vzdáleností při průmyslových explozích). 11. symposium o nových trendech v bezpečnosti procesů – nebezpečnost. 124, s. 255–275.
36. Ministerstvo energetiky USA (2008). Bezpečnostní školení na téma práce s vodíkem pro jednotky prvotního zásahu. K dispozici na adrese: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [přístup k datu 11.11.2020].
37. 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 06.11.2020].
38. Esbroeck, T a Vollmacher, K (2015). ISO propulsion energy identification (Identifikace pohonné energie ISO). Komise pro vyprošťování a nové technologie. Nepublikováno.
39. (NF) EN 469:2006-02. Evropská norma. Ochranné oděvy pro hasiče. Požadavky na vlastnosti ochranných oděvů pro hasiče.
40. (NF) EN 136: 1998. Evropská norma. Prostředky pro ochranu dýchacích cest. Celobličejevé masky. Požadavky, zkoušky, značení.
41. Schultz, MG, Market, F, Pilegaard, K (2004). Hydrogen and Environment (Vodík a životní prostředí). RisØ Energy Report, Roskilde, RisØ National Laboratory. S. 58–62
42. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. K dispozici na adrese: <http://cafcp.org/> [přístup k datu 09.11.2020].
43. Dokumenty Seveso. Guidance on applicability, assessment and legal documents for demonstrating compliance of industrial gases facilities with Seveso directive(s) (Pokyny k použitelnosti, posuzování a právním dokumentům pro prokazování shody zařízení na výrobu průmyslových plynů se směrnicí (směrnicemi) Seveso). Dokument 60/15, revize dokumentu 60/04. Evropské sdružení technických plynů AISBL.
44. Dealing with incidents involving pipelines (Řešení incidentů týkajících se potrubí), FPS Home Affairs. Generální ředitelství pro civilní bezpečnost. Červen 2009 – verze 2.2.

Příloha 1. Francouzské pokyny k tepelným účinkům souvisejícím se spalováním vodíku [8].

Scenario of a pipework leak	Tank pressure (bar)	Immediate combustion (flaming leak)			Delayed combustion (fire-ball)		
		Long duration thermal effects (kW/m ²)			Short-term thermal effects		
		3 kW/m ²	5 kW/m ²	8 kW/m ²	SEI ¹⁴	SEL ¹⁵	SELS ¹⁵
		The distances are in m			The distances are in m		
Hose from an articulated trailer	200	7.2	7.2	7.2	7	6.4	6.4
0.1 mm		0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4
0.2 mm		0.5	0.4	0.4	0.9	0.8	0.8
4 mm		11	9	8	17.6	16	16
0.1 mm	525	0.4	0.3	0.3	0.8	0.7	0.7
0.2 mm		0.7	0.6	0.6	1.5	1.3	1.3
2.3 mm		9	7.9	7	17	15	15
4 mm		17	15	13	29	26	26
5.16 mm		22	19	17	37	34	34
0.1 mm	450	0.2	0.2	0.2	0.7	0.6	0.6
0.2 mm		0.3	0.3	0.3	1.5	1.2	1.2
4 mm		16	14	12	27	24	24
5.16 mm		21	18	16	35	31	31
0.1 mm	700	0.2	0.2	0.2	0.8	0.8	0.8
0.2 mm		0.8	0.4	0.4	1.72	1.5	1.5
2.3 mm		10	9	8	19	18	18
4 mm		19	17	15	33	30	30

Poznámka: SEI – práh nevratných účinků; SEL – práh letálního účinku; SELS – významný letální účinek [8].

Příloha 2. Francouzské pokyny k účinkům přetlaku při zpožděném spalování vodíku [8].

Scenario of a pipework leak	Tank pressure (bar)	Length of flame (m)	Delayed combustion (fire-ball)			
			Effects of over-pressure (mbar)			
			20	50 (SEI)	140 (SEL)	200 (SELS)
			The distances are in m			
Hose from an articulated trailer	200		13.1	8.2		
0.1 mm		0.2	0.5			
0.2 mm		0.4	1	0.5		
4 mm		7	20	10	6	5
0.1 mm	525	0.4	1	0.5		
0.2 mm		0.8	2	1		
2.3 mm		7	18	9	6	5
4 mm		12	32	16	9	8
5.16 mm		15	42	21	12	10
0.1 mm	450	0.3	0.8	0.4		
0.2 mm		0.7	1.4	0.7		
4 mm		11	30	15	9	7
5.16 mm		14	38	19	11	9
0.1 mm	700	0.5	1	0.5		
0.2 mm		0.8	2	1		
2.3 mm		8	22	11	6	5
4 mm		14	38	19	11	9

Poznámka: SEI – práh nevratných účinků; SEL – práh letálního účinku; SELS – významný letální účinek [8].

Příloha 3. Referenční hodnoty související s prahem pro účinky přetlaku [8].

Level of overpressure	20 mbar	50 mbar	140 mbar	200 mbar	300 mbar
Effects on structures	Threshold for significant destruction of windows	Threshold for slight damage to structures	Threshold for serious damage to structures	Threshold for domino effects	Threshold for very serious damage to structures
Effects on man	Threshold for indirect effects by breakage of windows on man	Threshold for irreversible effects defined by significant danger to human life	Threshold for lethal effects defined by grave danger to human life	Threshold for lethal effects defined by very grave danger to human life	