



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 6

Kritéria poškození zdraví osob a majetku

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, 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: Velitel posádky.....	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky	5
1.3 Předchozí učení: Velitel posádky.....	5
2. Úvod a cíle	6
3. Hlavní definice	7
4. Zdravotní rizika související s únikem vodíku	8
4.1 Plynný vodík	8
4.2 Zkapalněný vodík.....	10
5. Škodlivé účinky spalování vodíku na člověka.....	11
5.1 Vliv teploty vzduchu	11
5.2 Vliv přímého kontaktu s vodíkovým plamenem.....	12
5.3 Vliv sálavého tepelného toku z vodíkových požárů.....	12
5.4 Účinky přetlaku na člověka.....	12
6. Vliv přetlaku na konstrukce a zařízení	13
7. Označování vodíkových systémů	14
8. Osobní ochranné prostředky	16
9. Vlivy na životní prostředí	18
Poděkování	18
Literatura a odkazy	18



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. 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 prostorech:
 - 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.

3. 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].

4. 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. 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.

4.1 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 mutagenní¹, teratogenní², 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.

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.



Konstrukce systému by měla zabránit možnosti udušení osob pracujících v uzavřených prostorách [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]

4.2 Zkapalněný vodík

Zkapalněný vodík se skladuje/používá za extrémně nízkých teplot díky svému nízkému bodu varu ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). 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 výpary 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.

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

- 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.

5. 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). Při sekundárních požárech však může vznikat kouř nebo jiné produkty hoření, které představují zdravotní riziko.

5.1 Vliv teploty vzduchu

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 1. 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 1.

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 zásahových

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].

5.2 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 2).

Tabulka 2. 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

5.3 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.

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.

5.4 Účinky přetlaku na člověka

Úrovně 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 prostorách 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 nejhrošším 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.

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.

6. Vliv přetlaku na konstrukce a zařízení

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. Označování vodíkových systémů

Piktogramy pro komerční přepravu vodíku jsou uvedeny na [obrázku 2](#), kde „1049“ označuje plynný vodík a „1966“ označuje kapalný vodík [36].



Obrázek 2. 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].

Hlavní kroky při vývoji symbolů pro formální určení nebezpečnosti jsou uvedeny na [obrázcích 3 a 4](#). Tyto barvy se používají také v informacích o záchranných akcích a pro barevné provedení součástí vozidla (záchranné listy).

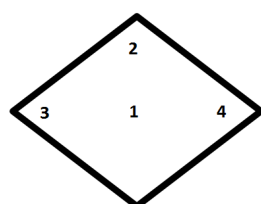
GREY	DIESEL
RED	GASOLINE
GREEN	GAS
WHITE	CRYOGEN LNG
BLUE	HYDROGEN
ORANGE	HIGH VOLTAGE

SYMBOLS

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



Obrázek 3. 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

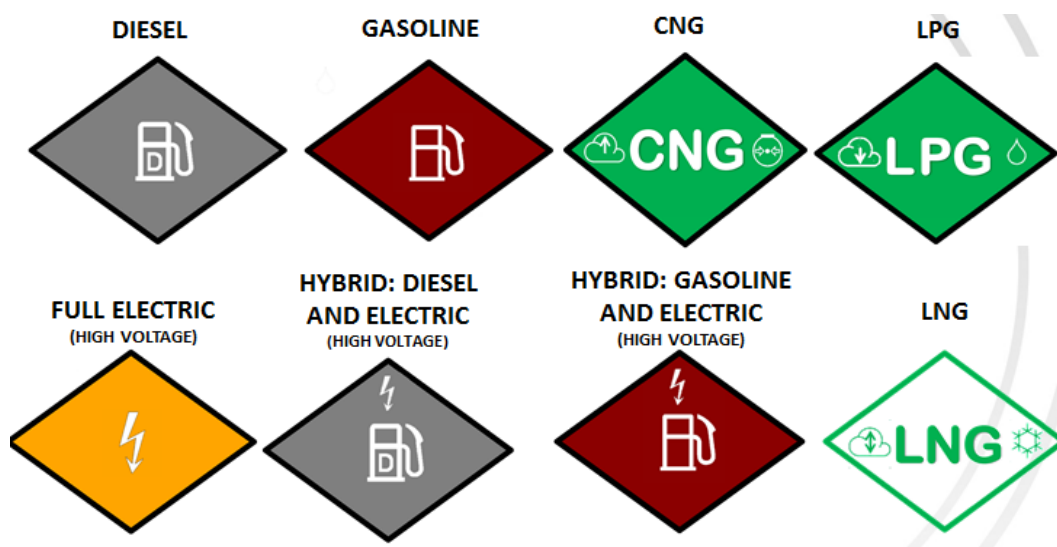
Obrázek 4. Kosočtverec navržený CTIF pro identifikaci nebezpečí ve vozidle [38]

Obrázek 5 obsahuje nejnovější verzi štítku pro FC vozidlo, na kterém jsou uvedeny dva hlavní zdroje energie: vodík (uprostřed) a elektrína 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 5. Symbol vyvinutý společností CTIF pro vozidlo s FC poháněné stlačeným plyným vodíkem [38]

Příklady symbolů navržených CTIF pro jiné typy vozidel, tradiční a hybridní, jsou uvedeny na obrázku 6.



Obrázek 6. Symboly vyvinuté CTIF pro různé druhy paliv/energií pro vozidla [38]



Obrázek 7. Formální identifikace metod používaná v USA [36]

8. 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.

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 čistících 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.

9. 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 (Podsystem 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 symposia 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. Celoobličejové 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://cafc.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.