

Bezpečnost při využívání vodíku



Tento výstup byl vytvořen v rámci projektu „Komplexní vodíková bezpečnost v Moravskoslezském kraji, č. TK05010075“, který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Théta.

Bezpečnost při využívání vodíku

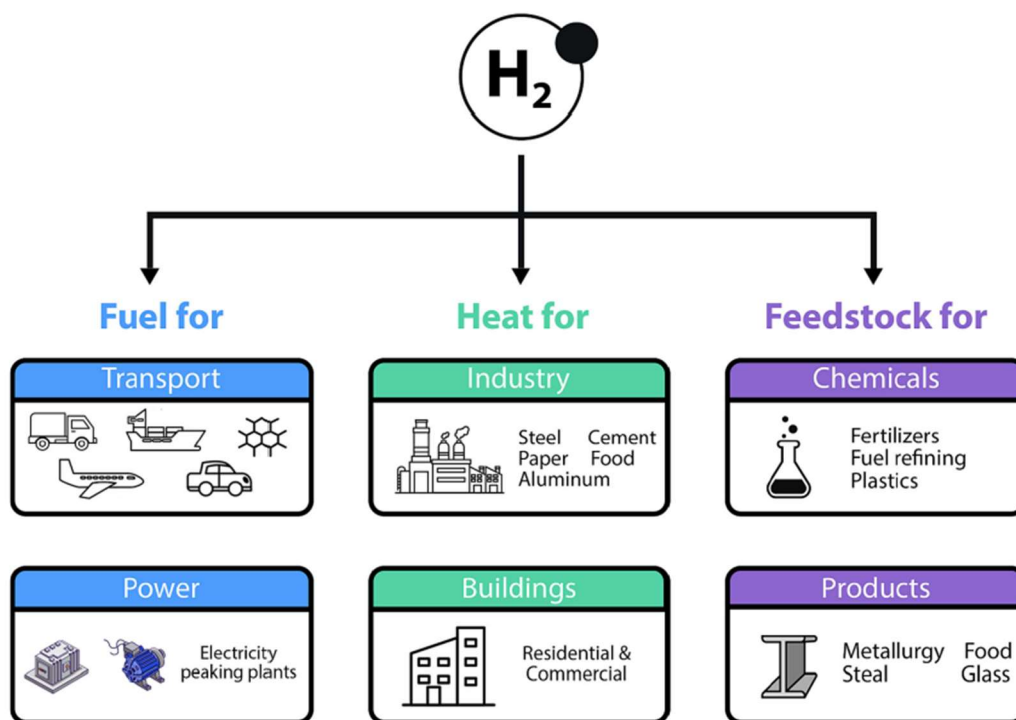
Obsah

1. Úvod k využívání vodíku	3
1.1. Vodík jako palivo.....	3
1.1.1. Doprava	4
1.1.2. Výroba energie	4
1.2. Palivo přímo pro výrobu tepla a energie	5
1.2.1. Výroba tepla v průmyslu	5
1.2.2. Vytápění obytných budov	5
1.3. Vodík pro využití v průmyslu	6
1.3.1. Chemická výroba	6
1.3.2. Petrochemický průmysl.....	6
1.3.3. Syntetická paliva.....	6
1.3.4. Výroba oceli.....	6
2. Legislativní a regulační požadavky	6
2.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s využíváním vodíku v České republice.....	6
2.2. Přehled norem v oblasti využívání vodíků platných v České republice	8
3. Řízení rizik a bezpečnostní opatření	10
3.1. Bezpečnostní aspekty využívání vodíku	10
3.2. Hlavní bezpečnostní rizika	11
3.3. Metody analýzy rizik – technické a procesní postupy	15
3.4. Bezpečnost při vodíkové mobilitě	16
3.5. Specifická rizika vodíkových technologií v dopravě	19
3.6. Bezpečnostní opatření při tankování vozidla vodíkem	20
3.7. Čerpací stanice vodíku	21
3.8. Požadavky na umístění a bezpečnostní vzdálenosti.....	25
3.9. Detekce úniku vodíku	26
3.10. Příklady nehod a jejich analýza.....	27
4. Závěr	32
5. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky.....	33

5.1.	Přehled legislativních požadavků souvisejících s využíváním vodíku v České republice	33
5.2.	Přehled norem v oblasti využívání vodíku platných v České republice	35
6.	Zdroje informací	37

1. Úvod k využívání vodíku

Vodík, má obrovský potenciál jako všestranný nosič energie a nachází široké uplatnění v různých sektorech. Jak ukazuje obrázek 6, může být používán jako čisté palivo, médium pro ukládání energie a důležitá surovina v průmyslových procesech. V energetickém sektoru lze vodík využít v palivových článcích k výrobě elektřiny, která pohání širokou škálu aplikací od dopravy po rezidenční a komerční zásobování energií. Vodík může být míchán se zemním plynem nebo používán v speciálních vodíkových spalovacích motorech ke snížení emisí.



Obrázek 1: Hlavní způsoby využití vodíku jako čistého paliva

Vodík je stále více uznáván jako čisté palivo s různorodým využitím v různých odvětvích. Zde jsou uvedeny hlavní oblasti, kde se vodík jako čisté palivo používá, a způsoby jeho využití v každé z nich.

1.1. Vodík jako palivo

Palivové články jsou elektrochemická zařízení, která generují elektrickou energii z chemické energie prostřednictvím redukčních reakcí.

Ačkoli běžné chemické zdroje energie pro palivové články pocházejí z uhlovodíků a uhlíkatých materiálů, jejich nevýhodou je, že produkují jako vedlejší produkt CO₂. V poslední době se jako přímý nosič energie v palivových článcích využívá vodík, který umožňuje výrobu ekologické energie. Při použití vodíku v palivových článcích vzniká jako vedlejší produkt elektřiny voda a teplo, což činí tento zdroj šetrným k životnímu prostředí. Kromě toho má využití vodíkových palivových článků nižší náklady na údržbu a delší životnost, protože obsahují méně pohyblivých částí.

Několik vlastností vodíku ho činí atraktivním pro dopravní průmysl. Ve srovnání s uhlovodíky, které uvolňují energii ve výši 42,8 MJ/kg, má vodík vysoké uvolňování energie, a to 119,96 MJ/kg při svém použití. Vodík je navíc charakterizován nízkou dynamickou viskozitou, nízkou molekulovou hmotností a vyšším specifickým impulsem, což ho činí žádoucím v leteckém průmyslu. Díky své odolnosti, možnosti skladování a přizpůsobivosti je vodík považován za dobrou alternativu k zemnímu plynu a jiným palivům v námořním průmyslu.

Nicméně, aby bylo možné plně využít potenciál vodíku v dopravním průmyslu, je třeba vyřešit otázky objemu skladování a požadavky na skladování při nízkých teplotách. Vodík má extrémně nízkou hustotu kolem 0,09 kg/m³ ve srovnání s běžnými palivy jako JP – 8 a benzínem, které mají hustoty 800 kg/m³ a 750 kg/m³ [13]. Navíc je v leteckém průmyslu spalování kapalného vodíku spojeno s nevýhodami nízké zapalovací energie a vysoké rychlosti hoření.

1.1.1. Doprava

Elektrická vozidla s palivovými články (FCEV)

Vodík se používá v palivových článcích k výrobě elektřiny, která pohání elektromotory ve vozidlech. Při tomto procesu reaguje vodík s kyslíkem v elektrochemickém článku, přičemž jako vedlejší produkty vznikají elektřina, voda a teplo. Vozidla FCEV mají oproti tradičním vozidlům se spalovacími motory několik výhod, včetně vyšší účinnosti - potenciálně dvakrát až třikrát vyšší než u benzinových motorů - a nulových výfukových emisí, takže jsou šetrná k životnímu prostředí.

Veřejná doprava

Vodíkové palivové články se používají také v autobusech a vlacích, které představují udržitelnou alternativu k veřejné dopravě poháněné naftou. Tato vozidla mohou být provozována na stávající infrastrukturu a zároveň přispívají ke snížení znečištění ovzduší ve městech.

Raketové palivo

Vodík se používá jako raketové palivo díky svému vysokému energetickému obsahu a účinnosti v kombinaci s kyslíkem v kapalné formě. NASA využívá kapalný vodík při svých vesmírných misích, čímž zdůrazňuje jeho úlohu v pokročilých aplikacích pro letectví a kosmonautiku.

1.1.2. Výroba energie

Stacionární palivové články

Vodíkové palivové články mohou dodávat elektřinu pro obytné, komerční a průmyslové aplikace. Fungují nepřetržitě, dokud je dodáván vodík, takže jsou vhodné pro záložní energetické systémy nebo energetická řešení mimo síť. Palivové články mohou například napájet kritická zařízení, jako jsou nemocnice a datová centra, a zajistit tak nepřetržitý provoz během výpadků.

Skladování energie v síti

Vodík lze vyrábět z přebytečné obnovitelné energie (např. z větru nebo slunce) elektrolýzou. Tento uskladněný vodík lze později v případě potřeby přeměnit zpět na elektřinu, což pomáhá vyrovnávat nabídku a poptávku v elektrické síti.

1.2. Palivo přímo pro výrobu tepla a energie

V současné době je značné množství energie vyrobené konvenčními technologiemi využíváno v topných a chladicích systémech a pro výrobu elektřiny. Bylo ověřeno, že využití vodíku v kotlích a topných systémech produkuje teplo s minimálními emisemi ve srovnání se zemním plynem. Vodík je také vhodný pro použití ve spalovacích jednotkách k výrobě elektřiny a v domácnostech pro vaření. Výhodou současného využití vodíku v domácnostech a průmyslu je jeho snadná přizpůsobitelnost stávající infrastruktury zemního plynu. V těchto případech je potřeba instalovat specializované hořáky do stávajících spalovacích jednotek kvůli rozdílné rychlosti spalování vodíku a zemního plynu [9]. To zajišťuje snadnou kontrolu plamene a brání neúplnému spalování nebo přehřátí.

Vodík lze využívat k vytápění v různých aplikacích a představuje čistší alternativu k tradičním fosilním palivům. Jeho univerzálnost umožňuje použití v průmyslových i obytných objektech.

1.2.1. Výroba tepla v průmyslu

Přímé spalování: Vodík lze spalovat v průmyslových pecích a kotlích, čímž vzniká teplo podobné zemnímu plynu. Při tomto procesu spalování se uvolňuje značné množství tepla, přičemž jako vedlejší produkt vzniká pouze vodní pára, čímž se snižují emise skleníkových plynů spojené se spalováním fosilních paliv.

Plynové turbíny: Vodík může sloužit jako palivo v plynových turbínách, kde se vyrábí vysokoteplotní pára používaná k výrobě elektřiny nebo k přímému ohřevu v průmyslových procesech. Tato integrace může zvýšit energetickou účinnost prostřednictvím systémů kombinované výroby tepla a elektřiny (CHP).

Vysokoteplotní aplikace: Odvětví, jako je výroba oceli, cementu a chemická výroba, vyžadují vysokoteplotní teplo, které vodík může poskytnout. Jeho využití v těchto odvětvích je zásadní pro dekarbonizaci procesů, které tradičně využívají paliva s vysokým obsahem uhlíku.

1.2.2. Vytápění obytných budov

Vodíkové topné systémy: Vodík lze použít v systémech vytápění obytných budov, jako jsou vodíkové kotle a palivové články. Tyto systémy buď spalují vodík k výrobě tepla, nebo využívají palivové články k výrobě tepla i elektřiny bez emisí při použití ekologického vodíku.

Vodíkové kotle: Stávající kotle na zemní plyn lze upravit pro spalování vodíku nebo směsi vodíku a zemního plynu. Tento přechod využívá stávající plynovou infrastrukturu a zároveň snižuje závislost na fosilních palivech.

1.3. Vodík pro využití v průmyslu

Vodík je stále více uznáván jako univerzální surovina, která může významně přispět k různým průmyslovým procesům, zejména při přechodu na nízkouhlíkové hospodářství. Jeho využití sahá do mnoha odvětví, včetně chemického průmyslu, výroby hnojiv a energie.

Hlavní oblasti využití vodíku v průmyslu jsou uvedeny dále.

1.3.1. Chemická výroba

Čpavek: Vodík je rozhodující složkou Haber-Boschova procesu syntézy čpavku. Tradičně se vyrábí z fosilních paliv, přechod na používání čistého vodíku může pomoci snížit emise uhlíku spojené s výrobou čpavku, který je nezbytný pro hnojiva.

Metanol: Vodík lze také využít k výrobě metanolu, který slouží jako klíčová složka různých chemikálií a paliv. Integrace vodíku do procesů výroby metanolu podporuje snahy o dekarbonizaci chemického průmyslu.

1.3.2. Petrochemický průmysl

V petrochemickém průmyslu se vodík používá k úpravě a rafinaci ropy. Ačkoli toto použití pokleslo v důsledku zvýšené závislosti na dovážených rafinovaných palivech, existuje potenciál, aby vodík pomáhal při úpravě biopaliv a snižování emisí v odvětví dopravy.

1.3.3. Syntetická paliva

Vodík lze kombinovat s oxidem uhličitým k výrobě syntetických paliv prostřednictvím procesů, jako je metanizace. Tím se nejen využívá CO₂, ale také se vytváří alternativa k fosilním palivům, což přispívá k energetické bezpečnosti a udržitelnosti.

1.3.4. Výroba oceli

V těžkém průmyslu, jako je výroba oceli, může vodík nahradit metody náročné na uhlí, které jsou tradičně závislé na koksovatelem uhlí.

2. Legislativní a regulační požadavky

Kapitola představuje základní legislativní předpisy včetně technických norem, které se vztahují k využívání vodíku. Další doplňující legislativní dokumenty jsou uvedeny v příloze A.

2.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s využíváním vodíku v České republice

1. Předpisy související s energetikou:

- **Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (energetický zákon)**

- Tento zákon upravuje podmínky podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích, včetně plynárenství, kam se vodík může zařadit jako potenciální palivo.
- **Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií**
 - Tento zákon se zabývá efektivním využíváním energií a podporou obnovitelných zdrojů energie, kam vodík částečně spadá jako alternativní energetický zdroj. Obsahuje také pravidla pro energetickou účinnost a podporu inovativních technologií,
- **Zákon č. 271/2014 Sb. o energetické účinnosti**
 - Tento zákon podporuje zvyšování energetické účinnosti, což může zahrnovat i aplikace využívající vodík jako energetický nosič.

2. Předpisy související s ochranou životního prostředí:

- **Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší**
 - Reguluje emise z různých průmyslových procesů, což může zahrnovat i technologie využívající vodík.
- **Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon)**
 - Vodní zákon reguluje činnosti, které mohou mít vliv na vodní zdroje a ochranu životního prostředí, včetně provozů, které skladují nebo používají nebezpečné látky jako je vodík.
- **Zákon č. 17/1992 Sb. o životním prostředí**
 - Tento zákon stanovuje základní principy ochrany životního prostředí a může se vztahovat na projekty spojené s výrobou a využitím vodíku, především v oblasti hodnocení vlivů na životní prostředí (EIA).
- **Zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí**
 - Upravuje postupy pro posuzování vlivů různých projektů, včetně těch, které se týkají vodíkových technologií.
- **Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech**
 - V případě, že výroba nebo využívání vodíku generuje odpady, tento zákon upravuje jejich nakládání a ochranu před negativními dopady na životní prostředí.

3. Předpisy související s bezpečností:

- **Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně**
 - Stanovuje požadavky na požární bezpečnost při výrobě a skladování vodíku.

- **Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi**
 - Tento zákon se vztahuje na provoz, který nakládá s nebezpečnými látkami, jako je vodík. Stanovuje povinnosti pro provozovatele těchto zařízení ohledně prevence havárií a havarijních plánů.

4. Ostatní související předpisy:

- **Zákon č. 183/2006 Sb., stavební zákon**
 - Tento zákon reguluje výstavbu zařízení pro skladování vodíku, včetně získání příslušných stavebních povolení a dodržování technických a bezpečnostních norem.
- **Zákon č. 311/2006 Sb., o pohonných hmotách a o čerpacích stanicích**
 - Zákon upravuje podmínky pro činnosti spojené s distribucí pohonných hmot, včetně vodíkových čerpacích stanic, což je relevantní pro infrastrukturu skladování a distribuce vodíku pro dopravní účely.
- **Zákon č. 350/2011 Sb. o chemických látkách a chemických směsích**
 - Tento zákon reguluje manipulaci s chemickými látkami a směsmi, včetně vodíku, a stanovuje podmínky pro bezpečnou manipulaci, přepravu a skladování

2.2. Přehled norem v oblasti využívání vodíků platných v České republice

ČSN ISO 19880-1: Plyný vodík – Čerpací stanice – Část 1: Obecné požadavky

- Tento dokument stanovuje minimální požadavky na návrh, instalaci, uvedení do provozu, provoz, kontrolu a údržbu pro zajištění bezpečnosti a tam, kde je to vhodné, pro zajištění provozu veřejných i neveřejných čerpacích stanic, které vydávají plyný vodík do lehkých silničních vozidel (např. elektrických vozidel s palivovými články).

ČSN ISO 19880-8: Plyný vodík – Čerpací stanice – Část 8: Kontrola kvality paliva

- Tento dokument stanovuje protokol pro zajištění kvality plyného vodíku v distribučních zařízeních a čerpacích stanicích pro palivové články silničních vozidel s technologií proton-výměnné membrány (PEM).

ČSN EN 17127: Venkovní výdejní vodíkové čerpací stanice na plyný vodík s plnicími protokoly

- Tento dokument definuje minimální požadavky na zajištění interoperability vodíkových čerpacích stanic, včetně protokolů o čerpání, které vydávají plyný vodík do silničních vozidel (např. elektrických vozidel s palivovými články), jež jsou v souladu s právními předpisy platnými pro tato vozidla.

ČSN EN 17124: Vodíkové palivo – Specifikace produktu a zajištění kvality pro čerpací stanice s výdejem plynného vodíku – Aplikace palivových článků s proton výměnnou membránou (PEM) pro vozidla

- Tento dokument specifikuje kvalitativní charakteristiky vodíkového paliva vydávaného na vodíkových čerpacích stanicích pro použití v systémech vozidel s palivovými články s protonovou výměnnou membránou (PEM) a odpovídající hlediska zajištění kvality pro zajištění jednotnosti vodíkového paliva.

ČSN ISO 14687: Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu

- Tento dokument specifikuje minimální kvalitativní charakteristiky vodíkového paliva, které se distribuuje pro využití v dopravních a stacionárních aplikacích.

ČSN 38 6405: Plynová zařízení, zásady provozu

- Norma platí pro obsluhu, provádění kontrol a revizí, vedení provozního deníku, zpracování místního provozního řádu a provoz plynových zařízení, včetně dovezených, provozovaných organizacemi. Norma obsahuje požadavky především na provádění obsluhy a oprav a (nejrozsáhlejší část) stanovuje společné bezpečnostní zásady vztahující se zejména na odvodušňování, odplynění, meze výbušnosti, kontrolu ovzduší a zjišťování netěsností.

ČSN EN IEC 60079-0 ed. 5: Výbušné atmosféry – Část 0: Zařízení – Obecné požadavky.

- Tato norma stanoví všeobecné požadavky na konstrukci, zkoušení a označování Ex zařízení a Ex součástí, určených pro použití ve výbušných atmosférách.

ČSN EN IEC 60079-10-1 ed. 3: Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry

- Tato norma uvádí postupy pro zařazování nebezpečných prostorů, ve kterých může vznikat nebezpečí od hořlavých plynů nebo par a může být použita jako základ pro správný návrh, konstrukci, provoz a údržbu zařízení určených pro použití v nebezpečných prostorech.
Norma je určena pro použití tam, kde může vznikat nebezpečí iniciace přítomných směsí hořlavých plynů a par se vzduchem.

ČSN EN 60079-14 ed. 4: Výbušné atmosféry – Část 14: Návrh, výběr a zřizování elektrických instalací.

- Tato norma obsahuje specifické požadavky pro navrhování, výběr, zřizování a výchozí revize elektrických instalací v nebezpečných prostorech nebo prostorech souvisejících s výbušnými atmosférami.
Pokud zařízení musí být vyhovující pro další podmínky okolí, například ochranu proti vnikání vody a odolnost proti korozi, mohou být nutné dodatečné metody ochrany. Požadavky této normy platí pouze pro použití elektrických zařízení v normálních atmosférických podmínkách.

ČSN 73 6060: Čerpací stanice pohonných hmot

- Tato norma platí pro ČS pohonných hmot (PH) a čerpací stanice zkapalněných ropných plynů (LPG) které jsou její součástí nebo se vyskytují v její blízkosti. Tato norma platí pro plnicí stanice H2.

Tato norma platí pro plnicí stanice a víceproduktové sdružené stojany pro prodej a výdej stlačeného zemního plynu (CNG), které jsou součástí čerpacích stanic pohonných hmot.

Tato norma platí pro dobíjecí stanice elektrických vozidel, které jsou součástí čerpacích stanic pohonných hmot dle

ČSN 650202: Hořlavé kapaliny. Plnění a stáčení výdejní čerpací stanice

- Norma platí pro projektování nových plnicích a stáčecích stanovišť hořlavých kapalin a topných olejů, výdejních čerpacích stanic s výdejními stojany nebo stáčecími a výdejními bloky a tankovacích stanic pro vnitrozemská plavidla a stanoví základní konstrukční požadavky pro nově konstruované výdejní stojany. Platí dále pro projektování změn staveb nebo technologických zařízení plnicích a stáčecích stanovišť čerpacích a tankovacích stanic, a to pro měněné části objektů nebo technologických zařízení.

ISO 23273 – Palivové články silničních vozidel – Bezpečnostní specifikace – Ochrana před nebezpečím vodíkových vozidel poháněných stlačeným vodíkem

- Norma specifikuje základní požadavky na vozidla s palivovými články (FCV) s ohledem na ochranu osob a životního prostředí uvnitř i vně vozidla před nebezpečím souvisejícím s vodíkem. Platí pouze pro taková FCV, kde se jako palivo pro systém palivových článků používá stlačený vodík. Norma se nevztahuje na výrobu, údržbu a opravy. Požadavky se týkají jak normálních provozních (bezporuchových), tak i jednorázových poruchových stavů vozidel.

3. Řízení rizik a bezpečnostní opatření

3.1. Bezpečnostní aspekty využívání vodíku

Bezpečnostní incidenty související s vodíkem přímo souvisejí s únikem vodíku. Vzhledem k tomu, že hustota vodíku je mnohem nižší než hustota vzduchu, uniklý vodík se rychle šíří nahoru a díky své vysoké difuzivitě se rozptýlí do vzduchu, což ve srovnání s úniky jiných plynů značně ztěžuje detekci místa úniku vodíku. Vodík má navíc ve vzduchu extrémně široký rozsah hořlavosti, což zvyšuje pravděpodobnost nehod s výbuchy. V uzavřených prostorech je proto nutné zajistit větrání, aby v případě úniku vodíku zůstala koncentrace vodíku pod mezí výbušnosti, obecně méně než 1 % objemového procenta. Vzhledem k tomu, že vodík je plyn nenápadný, bezbarvý, bez zápachu a bez chuti, je při úniku kriticky důležité jej detekovat pomocí spolehlivých a ekonomických senzorů s doplňkovými ochrannými strategiemi [4]. Použití relativně malého zásobníku vodíku nebo výstavba distribuovaných namísto centralizovaných úložných systémů může být praktickým způsobem, jak snížit velikost nebezpečí při úniku vodíku, i když to může být na úkor zvýšení pravděpodobnosti.

Před rozšířeným využíváním vodíku je nutné zajistit dostatečnou úroveň prevence výbuchu. Vzhledem k tomu, že vodík je považován za snadno výbušný plyn kvůli svému širokému rozsahu hořlavosti a relativně vysoké rychlosti hoření, mezinárodní vodíková komunita vyvíjí neustálé úsilí o získání informací o výbušných vlastnostech vodíku v různých koncentracích za účelem kontroly rizik a posouzení nebezpečí. Obecně platí, že okamžitý kontakt se zdrojem zapálení po úniku vodíku způsobí tzv. Jet Fire, zatímco opožděné zapálení po úniku vodíku způsobí výbuch. Při rychlém uvolnění velkého množství vodíku může díky jeho širokému rozsahu hořlavosti dojít k vytvoření obrovských výbušných směsí i na otevřených prostranstvích; při kontaktu se zdrojem zapálení dojde k rychlé turbulentní deflagraci s vysokým tlakem, která způsobí vážné škody výbuchem. V případě pomalého úniku vodíku je díky jeho rychlé difúzi do vzduchu a vznosu vzniklá při zemi zředěná směs plynu s obsahem vodíku v vzduchu nižším než 4 % nehořlavá. Riziko však přináší vznik tzv. kapes pod střechami nebo v jiných prostorách nad vodíkovými technologiemi.

Při využívání vodíku pod vysokým tlakem v uzavřených prostorách může docházet k nehodám způsobeným náhodným vniknutím oxidantu do nádoby; jakmile se hořlavá směs setká s malou jiskrou, může dojít k detonaci v důsledku rychlého šíření plamene a deflagrace

Vodík je bez zápachu a chuti, ale není vhodné přidávat do něj vonné látky pro monitorování úniku, tak jako se to dělá u uhlovodíků (zemní plyn, LPG...) protože přidání vonných látek do vodíku znečistí vodíkový plyn a ovlivní jeho konečné použití. K detekci úniku vodíku se často používají citlivé a rychlé senzory, aby se předešlo bezpečnostním rizikům.

3.2. Hlavní bezpečnostní rizika

Vodík je v několika ohledech nebezpečnější než benzín. Může se vznítit v poměrně širokém rozsahu směsi vodíku se vzduchem, od 4 % do 75 % (objemově), ve srovnání s metanem nebo benzinem, a k zapálení potřebuje velmi malé množství energie (0,02 mJ). Stejně jako metan je vodík neviditelný a bez zápachu, a proto je nutné přidávat vonné látky, aby bylo možné detekovat jeho přítomnost. Přidání barevných složek do plamene by usnadnilo jeho detekci. Tyto vonné a barevné látky však nesmí kontaminovat hydridy. Vodíkové plameny jsou velmi horké, ale vyzařují velmi málo tepla a jsou neviditelné, což ztěžuje jejich lokalizaci a tím i jejich hašení nebo vyhnutí se jim [1].

Nízká zápalná energie: Zápalná energie vodíku je pouze 1/17 energie potřebné pro metan. Z tohoto důvodu jsou zdroje s nízkou energií, jako je obyčejný statický výboj, který lze vytvořit například pouhým chozením po koberci, obvykle více než dostačující k zapálení vodíku. Bylo zaznamenáno, že dokonce i náhlý výtok vodíku vysokým průtokem přes pojistný ventil nebo prasklý disk může způsobit vznícení [4].

Odolnost při nárazu a umístění zásobníku: Umístění zásobníku paliva by mělo vycházet z praxe používané u benzinových nádrží v moderních automobilech, tedy přesunutí nádrže dál od obvodu vozidla.

Odpouštění vodíku a jeho umístění: V případě nouzových situací může být nutné odpouštět uskladněný vodík. Obecně může být nouzové odpouštění přes pojistné ventily připojeno k centrálnímu vývodu na bezpečném místě, daleko od lidí a vzduchových přívodů vozidel a energetických systémů.

Palivové potrubí a komponenty vystavené vodíku: Veškeré palivové potrubí a komponenty vozidla, které přicházejí do kontaktu s vodíkem, musí být kompatibilní s vodíkem. Potrubí by mělo být umístěno vně vozidla a pokud možno by se mělo vyhýbat uzavřeným prostorům. Při výběru materiálů pro vnější komponenty a potrubí je třeba vzít v úvahu náchylnost k vnějšímu korozi (např. silniční sůl během zimních měsíců a deštivé počasí). Palivové potrubí by mělo být dostatečně tvárné, aby odolalo nárazům bez prasknutí, a konstrukce musí zohledňovat vibrace od silnice nebo motoru [4].

Vodík má fyzikální a chemické vlastnosti, které zásadně odlišují způsob řízení rizik od jiných plynů. Tyto vlastnosti určují charakter úniků, mechanismy iniciace hoření a výbuchů, konstrukční požadavky na zařízení i potřebná organizační opatření. Využití vodíku proto vyžaduje specifický přístup k inženýrskému návrhu, provozu, údržbě a havarijnímu řízení. Kapitola shrnuje technické i procesní principy řízení rizik v rozsahu výrazně širším, než je obvyklé v běžných doporučeních, a vychází z rámců EHSP (2021), technických poznatků NFPA 2 a analýzy incidentů z databáze HIAD 2.0 (EHSP/JRC 2021). Fyzikálně-chemické vlastnosti s vlivem na riziko:

1. Minimální zápalná energie (MIE)

– Vodík: cca 0,02 mJ

– Zemní plyn: cca 0,28 mJ

Význam: i malé elektrostatické výboje mohou iniciovat hoření.

2. Rozsah hořlavosti ve vzduchu

– Vodík: 4–75 % obj.

– Umožňuje vznik hořlavých směsí v široké škále podmínek.

3. Laminar flame speed (rychlost hoření)

– Vodík: cca 2,65–3,25 m/s (podle teploty a koncentrace).

– Vyšší rychlost → vyšší potenciál rychlého nárůstu přetlaku.

4. Hustota a vztlak

– extrémně nízká hustota způsobuje rychlé stoupání vodíku;

– v uzavřených prostorech však dochází k akumulaci pod stropy.

5. Autoignition temperature

– cca 585 °C; riziko vznícení na horkých površích.

6. Vodíkové křehnutí materiálů

– Oceli, slitiny a některé polymery podléhají degradaci v přítomnosti vodíku.

– Je nezbytné používat materiály podle ISO 11114-1/-4.

(EHSP Guidance on Hydrogen Safety Engineering, 2021)

Vodík se vyznačuje velmi nízkou minimální zápalnou energií, která je přibližně 0,02 mJ, což znamená, že i drobný elektrostatický výboj nebo jiskra z elektronického zařízení mohou iniciovat zapálení. Rozsah hořlavosti vodíku ve vzduchu je mimořádně široký, od 4 % do 75 % objemu, a dovoluje vznik hořlavých směsí v podmínkách, kde by jiné plyny nehořely. Rychlost

šíření plamene je u vodíku několikanásobně vyšší než u zemního plynu, což může při hoření vést k rychlému nárůstu přetlaku. Vodík je extrémně lehký a má tendenci stoupat a shromažďovat se pod stropem, zejména v uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech, kde může vytvářet vrstvy směsí s vysokým výbušným potenciálem. Dalším podstatným rizikem je vodíkové křehnutí, při němž dochází k degradaci kovových materiálů v důsledku absorpce vodíku do jejich struktury. To může způsobovat praskání, ztrátu pevnosti a předčasné poruchy potrubí, přírub, ventilů nebo tlakových komponent. Z tohoto důvodu je nutné používat materiály, které jsou certifikovány pro provoz s vodíkem podle příslušných norem ISO.

Z hlediska bezpečnosti je důležité rozlišovat různé typy úniků. Kontinuální úniky způsobené drobnými netěsnostmi a mikrotrhlinami mohou dlouhodobě způsobovat akumulaci vodíku v horních částech prostoru. Rychlé vysokotlaké úniky, které vznikají například selháním spojů nebo ventilů, vytvářejí turbulentní výtrysky, které se mohou okamžitě zapálit a vytvořit intenzivní proudový plamen. Katastrofická selhání tlakových nádob vedou k náhlému uvolnění velkého množství energie a mohou způsobit destruktivní události podobné BLEVE. Pokud se jedná o kapalný vodík, do chování úniku vstupují i jevy spojené s nízkou teplotou a dvoufázovým prouděním. Mechanismy iniciace výbuchů zahrnují flash fire, při němž se zapálí hořlavý oblak bez významného přetlaku, výbuch oblaku (VCE) vznikající při akumulaci a následném turbulentním hoření, deflagraci spojenou s rychlým nárůstem přetlaku a vzácné, avšak vysoce destruktivní detonace. Kombinovaná rizika vznikají například při současném působení vysoké teploty a tlaku, elektrostatického výboje v prostředí úniku, vibrací, materiálové únavy nebo zpětného toku kyslíku do potrubí s vodíkem.

Přehled zásadních bezpečnostních rizik pro jednotlivé technologie je uveden v navazující tabulce. Vodíkové technologie se neustále vyvíjejí, a proto se rovněž mění charakter a závažnost bezpečnostních rizik, které je tak nutné neustále vyhodnocovat.

Tabulka č. 2: Hlavní rizika a důsledky u nejčastějších technologií

Technologie/Aplikace	Hlavní rizika	Možné důsledky	Bezpečnostní opatření
Průmyslové procesy (rafinérie, amoniak)	Úniky pod vysokým tlakem/teplotou, vodíkové křehnutí materiálů (embrittlement).	Exploze, požáry, mechanické selhání.	Speciální materiály, detektory úniků, ventilace.
Palivové články a stacionární systémy	Nahromadění vodíku v uzavřených prostorech, neviditelný plamen.	Požár, udušení (vytlačení kyslíku).	Senzory H ₂ , automatické vypnutí, odorizace (přidání zápachu).

Technologie/Aplikace	Hlavní rizika	Možné důsledky	Bezpečnostní opatření
Doprava (FCEV, tankování)	Úniky při tankování/nárazu, vysokotlaké nádrže (až 700 bar).	Jet fire (tryskový požár), exploze.	Crash testy, bezpečnostní ventily, detekce úniků na stanicích.
Skladování a přeprava	Kapalný vodík (-253 °C): kryogenní rizika; stlačený: vysoký tlak.	Rychlé odpařování, detonace při smíšení s vzduchem.	Izolované nádrže, tlakové ventily, monitorování.
Obecné rizika	Nízká detekovatelnost, rychlá difúze, možný přechod deflagrace na detonaci (DDT).	Katastrofické exploze v uzavřených prostorech.	Normy (např. ISO, NFPA), školení, rizikové analýzy (HAZOP).

Rizika jsou dobře známá z desetiletí průmyslového používání (např. chemický průmysl, kosmonautika, rafinérie) a nehody jsou relativně vzácné díky přísným standardům. Vodík se rychle rozptyluje venku, což snižuje riziko oproti benzínu, naproti tomu je mnohem nebezpečnější v uzavřených prostorech. Přesto vyžaduje speciální senzory a protokoly pro nové aplikace v dopravě a energetice.

Celkově vodík představuje klíčovou technologii pro dekarbonizaci, ale jeho bezpečné nasazení vyžaduje dodržování norem a investice do bezpečnostních systémů.

Typologie úniků vodíku z hlediska bezpečnosti

- Kontinuální únik**
 - malé trhliny, netěsnosti, opotřebené těsnění;
 - riziko akumulace v horních částech prostor.
- Rychlý vysokotlaký únik**
 - selhání hadice, ventilů, vysokotlakých spojů;
 - vytváří turbulentní proud s vysokou rychlostí → možnost jet fire.
- Katastrofické selhání (rupture)**
 - prasknutí tlakové nádoby, selhání TPRD;
 - vede k okamžitému uvolnění velkého množství H₂.
- Únik dvoufázového média (LH₂)**
 - odlišné chování, nízké teploty, riziko kondenzace vzduchu

Mechanismy iniciace výbuchů

- **Flash fire:** zapálení oblaku hořlavé směsi bez významného přetlaku.
- **VCE (Výbuch parního oblaku):** turbulentní hoření uzavřeného či polouzavřeného oblaku; přetlaky 5–200 kPa.
- **Deflagrace:** rychlá fronta plamene generující přetlak.
- **Detonace:** rychlosti až 1500–2000 m/s, tlaková fronta >10 bar.
- Výskyt detonací je vzácný, ale v uzavřených strukturách nediskutovatelně možný. (*HIAD 2.0 Incident Analysis, EHSP/JRC 2021*)

Kombinovaná (multi-hazard) rizika

- Vysoký tlak + vysoká teplota → selhání TPRD.
- Únik + elektrostatika → okamžité zapálení.
- Únik + nedostatečné proudění → akumulace pod stropem.
- Vibrace + únava materiálu → praskání potrubí.
- $H_2 + O_2$ zpětným tokem → extrémně nebezpečná směs.

3.3. Metody analýzy rizik – technické a procesní postupy

Řízení rizik při využívání vodíku vyžaduje kombinaci kvalitativních, semikvantitativních i kvantitativních metod. Základním krokem je metoda HAZID, která v rané fázi projektu identifikuje potenciální nebezpečí související s úniky, selháním ventilace, zdroji vznícení, konstrukčními chybami i provozní nekompetencí. HAZOP se zaměřuje na systematickou analýzu provozních odchylek, které se hodnotí pomocí guide words. Tato metoda nachází uplatnění zejména v čerpacích stanicích, potrubních systémech, průmyslových aplikacích a místnostech s palivovými články.

Analýza FMEA se používá pro identifikaci poruchových módů jednotlivých komponent a posouzení jejich dopadu na systém. Z databáze HIAD 2.0 vyplývá, že k nejčastějším poruchám patří netěsná sedla ventilů, selhání elektromagnetických ventilů, materiálové poruchy potrubí a drift hodnot detekčních čidel.

Metoda LOPA ověřuje funkčnost a dostatečnost jednotlivých ochranných vrstev, jako je detekce vodíku, automatické odstavení technologie, ventilace, tlakové pojistky a bezpečnostní logika. V případě vysokotlakých aplikací nebo čerpacích stanic je LOPA zásadní pro určení, zda je riziko akceptovatelné.

Kvantitativní analýza rizik (QRA) se používá zejména u velkých vodíkových hubů, průmyslových procesů a rozsáhlejších čerpacích stanic. Zahrnuje frekvenční analýzu úniků, modelování scénářů jet fire, VCE a detonací a vyhodnocení individuálního a společenského rizika. Modelování zahrnuje výpočet hazardních vzdáleností, přetlakových účinků a radiačních toků.

3.4. Bezpečnost při vodíkové mobilitě

Rozsáhlé využití vodíku v oblasti vozidel poháněných vodíkem bývá často prvním scénářem vodíkové ekonomiky. Ve srovnání s konvenčními vozidly poháněnými kapalným palivem vznikají u vozidel poháněných vodíkem další bezpečnostní rizika v důsledku požáru a výbuchu při úniku vodíku při dopravních nehodách a poruchách vozidel. Posouzení rizik možných míst nehod s vodíkem ukazuje, že v uzavřených prostorech, jako jsou garáže, je riziko požáru a výbuchu způsobené únikem vodíku vyšší než riziko způsobené benzínem. Proto jsou pro vozidla poháněná vodíkem vyžadovány přísnější bezpečnostní konstrukce, spolehlivější a rychleji reagující systémy detekce úniků a přísnější konstrukce obvodů, což zvyšuje jejich náklady.

Vozidla s palivovými články na vodík mají mnoho výhod, jako je šetrnost k životnímu prostředí, nulové emise, vysoká míra využití energie atd. Je všeobecně uznáváno, že vodíkové palivové články budou v budoucnu jedním z hlavních pohonů pro dopravu. Vzhledem k použití vodíku a složitosti palivových článků je však třeba intenzivně studovat bezpečnost vozidel s vodíkovými palivovými články.

U vozidel s palivovými články je bezpečnost systému pro skladování vodíku velmi důležitá. Je zřejmé, že skladování vodíku pod vysokým tlakem je vyspělá technologie s nejnižšími náklady. V současné době většina vozidel s palivovými články využívá metodu skladování vodíku pod vysokým tlakem. Aby však bylo možné přepravit dostatečné množství vodíku pod vysokým tlakem pro dojezd nad 400 km, musí být nádrž na skladování vodíku vyrobena z kompozitního materiálu, který musí být řádně ověřen.

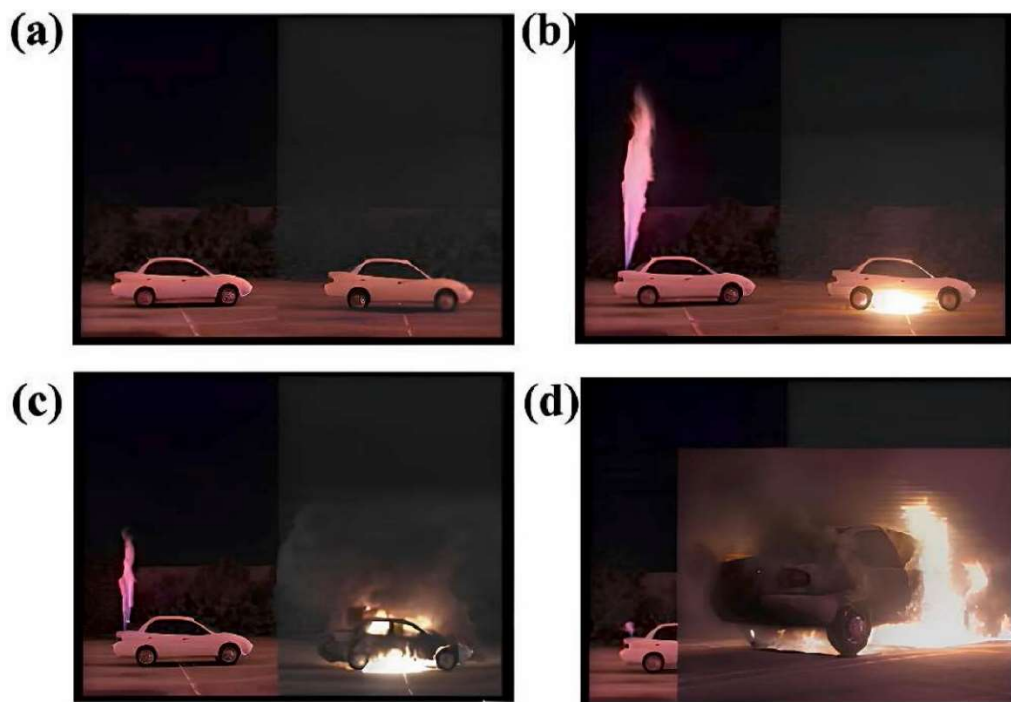
U vozidel s palivovými články je bezpečnost systému skladování vodíku velmi důležitá. Srovnání různých technologií skladování vodíku ve vozidlech je uvedeno v tabulce 2. Je vidět, že vysokotlaké skladování plynného vodíku je vyspělou technologií s nejnižšími náklady. V současné době většina vozidel s palivovými články používá metodu vysokotlakého skladování plynného vodíku. Aby však bylo možné přepravovat dostatečné množství vysokotlakého vodíkového plynu, aby vůz dosáhl dojezdu 400 km, musí být zásobník vodíku vyroben z kompozitního materiálu, který vydrží tlak až 70 MPa. Skladování kapalného vodíku má vysokou hmotnostní hustotu skladování vodíku, přibližně trojnásobnou oproti plynnému stavu. Ke zkapalnění je však třeba vodík ochladit na teplotu $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$, což spotřebovává velké množství energie. Kromě toho je kapalný vodík obtížné uchovávat kvůli jeho odpařování [6].

Tabulka 2: Rozdílné technologie skladování vodíku pro vozidla s palivovými články

Hydrogen storage Technology	Mass hydrogen Storage density	Main advantages	Main disadvantages
High pressure gas	5.7	Mature technology	Low hydrogen storage density
Low pressure liquid	5.7	High hydrogen storage density	Volatile and high cost
High pressure liquid	7.4	High hydrogen storage density	High cost and poor safety
Metal hydride	4.5	Easy to operate	Low hydrogen storage density
Organic liquid	7.2	High hydrogen storage density	High cost and difficult to operate

Úkolem systému zásobování vodíkem je distribuovat vodík z vysokotlakého zásobníku vodíku na palubě do zásobníku palivových článků prostřednictvím redukčního ventilu a potrubí.

Díky svým jedinečným fyzikálním a chemickým vlastnostem má vodík oproti jiným palivům bezpečnostní výhody. Vodík je například netoxický a může rychle unikat vzduchem. Benzín však může ulpívat na dně vozidla a nesnadno se rozptýluje odpařováním, což vede k vážnějším požárním nehodám. Na obrázku níže je znázorněna vývoj požáru na vozidle s palivovými články poháněným vodíkem a na vozidle se spalovacím motorem poháněným benzínem [7].



Obrázek 3: Vývoj požáru na vozidle s palivovým článkem (vlevo) a na vozidle s benzínovým motorem (vpravo) v případě úniku paliva v čase a) 0 s, b) 30 s, c) 60 s a d) 90 s.

Čas: 0 s: Vlevo je vozidlo na vodíkový palivový článek a vpravo vozidlo na benzin.

Čas: 30 s: Po vzplanutí. Z palivové nádrže vozidla s vodíkovými palivovými články se vymrští proud ohně. Rozšiřující se požár se rozvíjí ve spodní části benzinového vozidla.

Čas: 60 s: Tryskající oheň na vozidle s palivovými články slábne, jak se vodík spotřebovává. Tryskový oheň způsobuje na vozidle s vodíkovými palivovými články jen malé škody. Zatímco požár na benzinovém vozidle sílí.

Čas: 90 s: Oheň na vozidle s palivovými články téměř vyhoří, zatímco oheň na benzinovém vozidle hoří dál. Benzinové vozidlo nakonec zcela shořelo a zůstal z něj jen rám, zatímco vozidlo s palivovými články bylo po požáru mírně poškozeno. Je vidět, že vozidlo s palivovými články je v případě úniku paliva mnohem bezpečnější než tradiční benzinové vozidlo.

Pokud se vozidlo s palivovými články setká s kolizní nehodou, dojde k úniku vodíku, který způsobí nebezpečnou situaci. Proto jsou nutná bezpečnostní opatření pro vodíkovou nádrž. Vodíková nádrž by měla mít dostatečnou konstrukční pevnost a měla by být pevně uchycena. Kromě vodíkové nádrže jsou vysokotlaká potrubí a ventily upevněny ocelovými pásy, aby se zabránilo posunu polohy při kolizi.

Vodík je sice hořlavý, výbušný a má vyšší nároky na materiály, ale při správném provozním postupu a preventivních opatřeních lze zaručit bezpečnost vozidel na vodíkové palivové články, dokonce bezpečnější než u tradičních vozidel na benzin. Díky dalšímu výzkumu bezpečnosti při manipulaci s vodíkem a jeho využití bude možné realizovat rozsáhlou implementaci vozidel na vodíkové palivové články.

Vodík má do značné míry neoprávněnou pověst jako obzvláště nebezpečné palivo kvůli jeho výbušnosti, což vyvolává obavy o bezpečnost přepravy většího množství vodíku v palivové nádrži vozidla. Nicméně, protože je vodík nejlehčí plyn, má tendenci se v případě porušení kontejneru rychle rozptýlit, což může znamenat méně rizik než benzín.

Při experimentování s vodíkovými motory a při skladování vodíku na palubě vozidel by měla být přijata různá bezpečnostní opatření. Podle Dase [2] by měly být vodíkové přívodní potrubí vedena raději střechou, čímž se minimalizují nebezpečné účinky případných nechtěných úniků. Na všech zranitelných místech by měly být instalovány těsnění, aby se zabránilo úniku vodíku. Veškeré potrubí a zařízení by měly být před instalací vyčištěny, a palivový systém by měl být propláchnut dusíkem, protože během plnění a otevření systému jsou nejvyšší rizika kontaktu vodíku se vzduchem v potrubí. Nouzový systém vypnutí paliva by měl být zahrnut těsně před místem vstupu paliva do motoru. Návod k provozu systému a příslušné výkresy by měly být umístěny v blízkosti zařízení, aby poskytovaly stálé pokyny a bezpečnostní opatření pro obsluhující personál.

Pro bezpečný provoz vodíkového motoru doporučili Nagalingam a kol. [3] instalaci záchytné klapky v přívodním potrubí vodíku, ventilátor k odvedení úniku vodíku v klikové skřini, použití magnetických ventilů v přívodu vodíku, které při zastavení motoru vypnou proud a uzavřou vodíkový ventil, a vodíkový alarm v motorovém prostoru.

3.5. Specifická rizika vodíkových technologií v dopravě

Hlavní identifikovaná nebezpečí a havarijní scénáře zahrnují:

- **Únik vodíku z tlakového systému:** Může být způsoben poruchou těsnění, prasklinou potrubí, selháním ventilu nebo chybou obsluhy (např. neodpojená hadice). Unikající plyn může vytvořit výbušnou směs se vzduchem. Riziko: výbuch nebo požár obzvláště, pokud se plyn shromáždí v uzavřeném prostoru. Prevence: kvalitní materiály odolné vůči vodíkové křehkosti, redundantní těsnění, pravidelné kontroly těsnosti (např. detekce čichací sondou), instalace detektorů vodíku. Při návrhu se také uplatňuje princip maximálního omezení množství úniku – např. instalovat uzavírací ventily co nejbližší nádrži, aby při prasklém potrubí uniklo jen minimum vodíku (mezi nádrží a prvním ventilem).
- **Vznícení uniklého vodíku:** Vodík se ...Vznícení uniklého vodíku – pokud dojde k úniku a je přítomen zdroj iniciace (jiskra, horký povrch, plamen), vodík se může okamžitě vznítit. Vzniká tzv. jet fire – hořící proud plynu. Takový plamen má vysokou teplotu a může způsobit popáleniny či zapálit hořlavé materiály v blízkosti, avšak sálavé teplo je relativně malé a plamen šlehající vzhůru bývá úzký. Rizikem je zejména, pokud by hořící vodík zasáhl jiné tlakové zařízení (např. nádrž) – proto se musí konstrukce chránit (chlazením, tepelnou izolací) a případně rychle odtlakovat pojistkami, aby nedošlo k explozi nádoby.
- **Výbuch vodíko-vzdušné směsi** – nejzávažnější scénář nastává, pokud vodík uniká delší dobu v uzavřeném prostoru nebo bez zapálení, vytvoří se větší oblak výbušné směsi a posléze dojde k její iniciaci. Následná deflagrace (výbuch) může vytvořit tlakovou vlnu ničící zařízení a ohrožující osoby. Pokud je směs v omezeném objemu (např. místnost), může dojít i k detonaci. Prevence spočívá v tom, že se zabrání hromadění vodíku (viz větrání kap. 5.2) a eliminují se zdroje zapálení. V reálných případech mívá první výbuch na svědomí právě nahromaděný oblak vodíku, jenž se zapálil.
- **Mechanické selhání tlakové nádoby nebo aparatury** – i když velmi nepravděpodobné (vodíkové nádrže procházejí přísnými zkouškami), nelze úplně vyloučit. Například při velkém požáru může dojít k výbuchu nádoby s plynem v důsledku zahřátí. Nebo vlivem materiálové vady či křehnutí může prasknout potrubí. Taková událost by vedla k okamžitému nekontrolovanému úniku a možná i k fragmentaci nádoby – to je extrémní případ s vysokým rizikem zranění odletujícími úlomky a ohněm. Proto jsou bezpečnostní systémy navrženy tak, aby tomuto zabránily (ventily upustí tlak při přehřátí, inspekce odhalí trhliny dříve než dojde k lomu). Ze známých nehod lze uvést případ v Norsku 2016, kdy prasklo potrubí vodíku vinou vodíkové křehkosti šroubů – došlo k úniku, ale naštěstí bez požáru.
- **Materiálová degradace a křehnutí** – vodík může pronikat do ocelí a způsobovat tzv. vodíkové zkrhnutí materiálu, což snižuje pevnost (zejm. vysoce pevné oceli a některé slitiny). To může vést k prasklinám a netěsnostem v dlouhodobém horizontu. Riziko se minimalizuje volbou vhodných materiálů (nádrže z kompozitů, nerez ocel odolná proti

H₂) a dodržováním provozních limitů (tlak, počet cyklů). Součástí prevence je i pravidelná nedestruktivní kontrola kritických dílů (např. ultrazvukem na trhliny).

- **Lidská chyba** – stejně jako u jiných technologií, i zde může lidský faktor způsobit nehodu. Příkladem je špatná montáž komponent (viz. případ Kjørbo – chybná montáž zátky), nedodržení postupu při údržbě, nebo třeba opomenutí uzavření ventilu. Proto je zásadní školení personálu a vytvoření jasných postupů. Také systém hlášení incidentů a „těsných úniků“ (near-miss) by měl fungovat – každý drobný únik či závada musí být analyzována a odstraněna dříve, než způsobí vážnou nehodu.

Vedle těchto specifických rizik vodíku samozřejmě existují i obecná rizika společná s jinými pohony (např. riziko úrazu elektrickým proudem z baterií či palivových článků, riziko dopravní nehody vozidla atd.), která se řeší běžnými prostředky (izolace vysokého napětí, robustní konstrukce vozidel atd.). Celkově analýzy rizik ukazují, že nejpravděpodobnějšími incidenty jsou malé úniky a technické závady (kompresoru, ventilů), zatímco katastrofické selhání je extrémně vzácné. Správným návrhem a provozem lze rizika udržet na přijatelné úrovni, jak dokládají statistiky zkušebních provozů – vodíkové autobusy najezdily v Evropě miliony kilometrů bez vážné nehody, a většina vodíkových čerpacích stanic funguje bezpečně.

3.6. Bezpečnostní opatření při tankování vozidla vodíkem

Aby se předešlo nehodám při tankování vozidla vodíkem, je třeba dodržet následující bezpečnostní opatření:

- **Zabránit statickému výboji** uzemněním a spojením vozidla. Během tankování by měly být použity alespoň dva způsoby uzemnění. Prvním je zabudování uzemňovacích vertikálních kovových vláken (asi 0,3 m dlouhých) do silnice na místě tankování. Druhým způsobem je připojení uzemňovacího drátu k vozidlu před tankováním. Tento uzemňovací drát je propojen a spojen s vodíkovým zásobníkem a jeho uzemňovacím systémem. Třetím způsobem je zahrnutí uzemňovacího drátu přímo do palivové hadice, která zajistí kontakt s uzemněním a spojení před prouděním nebo uvolněním vodíku.
- **Tankování by mělo probíhat venku:** Motor vozidla by měl být vypnutý a tento stav může být propojen s palivovým výdejním systémem. Detekční systémy úniků a požárů by měly být použity spolu s automatickým vypnutím.
- **Vyhnout se tankování během bouřek** s rizikem blesků.
- **Zabránit vniknutí vzduchu do plnicích linek a nádrže:** Při tankování plyným vodíkem je třeba podniknout kroky, aby se zajistilo, že v hadici nebo potrubí vozidla není žádný vzduch.

Skladování vodíku je větší problém než u jiných paliv, jako je benzín a nafta. Skladování stlačeného vodíku může být řešením pro automobily v městských oblastech, ale představuje

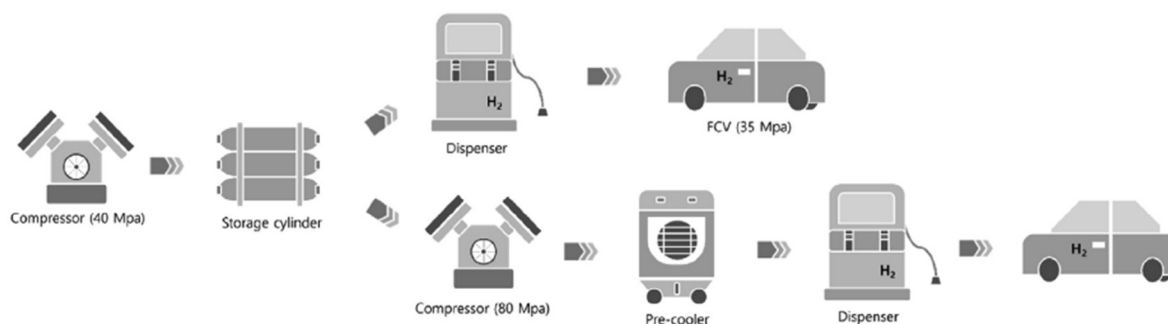
vážný problém pro nákladní vozidla, která vyžadují časté tankování a větší počet čerpacích stanic. Vybudování nové infrastruktury vyžaduje více času, ale pokročilé technologie v budoucnu zjednoduší a zvýší bezpečnost tohoto systému [1].

3.7. Čerpací stanice vodíku

Čerpací stanice vodíku jsou důležitými zařízeními pro automobily a autobusy na vodíkový pohon. Skládají se z kompresoru, zásobníku, chladiče a čerpadla, jak je znázorněno na obrázku 3. Níže stručně představujeme současné technologie kompresorů a zásobníků.

Typy kompresorů používaných na čerpacích stanicích vodíku jsou klasifikovány jako membránové, pístové nebo iontové. Membránový kompresor používá tři vrstvy desek k stlačení vodíkového plynu pomocí hydraulického tlaku; téměř nedochází k únikům plynu, náklady na údržbu jsou nízké a je možný nepřetržitý provoz [5]. Pístový kompresor používá píst k stlačení vodíkového plynu. I když je jeho konstrukce jednoduchá a údržba přímočará, došlo k několika únikům plynu [5]. Princip činnosti iontového kompresoru je stejný jako u pístového kompresoru, přičemž úniky plynu jsou zamezeny použitím iontové kapaliny. Ačkoliv může pracovat při nízkém nasávacím tlaku a poskytovat stabilní hmotnostní tok, náklady na údržbu jsou vysoké [5].

Na čerpacích stanicích vodíku lze používat zásobníky kovové typu 1 až typu 4. Zásobníky typu 1 jsou vyrobeny z kovových materiálů, a jsou tedy levné na výrobu, ale těžké. Z tohoto důvodu se zásobníky typu 1 běžně používají v průmyslu. Na druhé straně, zásobníky typu 4 používají plastové vložky, a jsou tedy lehké. Díky dobré hmotnostní výkonnosti jsou zásobníky typu 4 slibné pro mobilní aplikace. Přesto je obtížné najít výrobce a jsou náchylné na teplo, takže je zapotřebí dalšího výzkumu. Kapacita zásobníku je obvykle kolem 300 litrů a skladovací tlak je přibližně 800 barů [5].



Obrázek 4 Diagram čerpacích stanic

Metody plnění vodíkem na čerpacích stanicích vodíku

Čerpací stanice vodíku jsou zásobovány vodíkem buď centrálně (z vnějšího zdroje), nebo lokálně (na místě). Při centrální metodě je vodík vyráběn v určité oblasti a poté přepravován na čerpací stanici vodíku prostřednictvím potrubí nebo cisternového přívěsu. I když jsou náklady na výrobu vodíku nízké, náklady na přepravu bývají vysoké. Na druhé straně při metodě lokálního zásobování je vodík vyráběn přímo na/poblíž čerpací stanici vodíku. Nicméně, instalační náklady jsou vysoké, protože je vyžadována licence pro výrobní zařízení

vodíku na čerpací stanici. Typy plnění vodíkem na čerpacích stanicích jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 1 Varianty nabíjecích metod na vodíkových stanicích

Dodávka vodíku	Metoda	Forma vodíku	Specifikace
Místní dodávka (on-site)	Reforming vodní párou	CGH ₂	NG, metan, metanol, LPG.
Místní dodávka (on-site)	Elektrolýza vody	CGH ₂	Elektřina, vítr, slunce.
Centrální dodávka (off-site)	Zkapalnění	LH ₂	Přímé plnění kapalnému vodíku.
Centrální dodávka (off-site)		LCGH ₂	Doplňování vodíku po přeměně na LCGH ₂ .
Centrální dodávka (off-site)	Plynný	CGH ₂	Válec, cisternový návěs, potrubí.

Podle **provedení a účelu** lze plnicí stanice dělit na:

1. Veřejné vodíkové čerpací stanice – obdobné klasickým čerpacím stanicím, přístupné široké veřejnosti. Obvykle jsou konstruovány jako vícistanovištní, tj. umožňují obsluhu několika vozidel (osobních i nákladních) s možností postupného plnění. Musí splňovat všechny legislativní požadavky pro čerpací stanice pohonných hmot (stavební, bezpečnostní, metrologické aj.). Z hlediska provozní bezpečnosti nejsou zásadní rozdíly mezi stanicí veřejnou a neveřejnou – v obou případech se musí dodržet technické principy a normy pro práci s vodíkem.
2. Podnikové (neveřejné) plnicí stanice – instalace určené pro interní potřebu určitého provozovatele, např. dopravního podniku pro plnění flotily vodíkových autobusů. Tyto stanice mohou být menší a jednodušší (např. s jedním plnicím stojanem), někdy i částečně mobilní či kontejnerové pro možnost přemístění. Musí však splňovat stejné bezpečnostní standardy jako veřejné stanice. Rozdíl je, že nemusí mít certifikované výdejní stojany pro komerční styk (není potřeba fiskální systém pro platby atd.), pokud slouží pouze pro neveřejné plnění. Příkladem je plnicí stanice ve vozovně Dopravního podniku města Ostravy, zprovozněná v r. 2022 pro flotilu 10 vodíkových autobusů – jde o podnikový areál bez přístupu veřejnosti.
3. Dočasné (mobilní) plnicí stanice – pro účely zkušebního provozu či prezentace technologií existují i mobilní jednotky, kde je vodík obsažen v přenosných zásobnících a stanice může být přepravena např. na návěsu. Tyto mobilní stanice mají omezenou kapacitu a nižší výdejní výkon, jsou však cenné pro demonstrace nebo dočasné nasazení, než je vybudována trvalá stanice. Z hlediska bezpečnosti vyžadují mobilní stanice pečlivé zajištění stabilního umístění, ochranu před neoprávněnou manipulací a dodržení odstupů jako u stálé stanice.

Bezpečnost čerpacích stanic na vodík: Zajištění udržitelnosti a prevence rizik

V posledních letech se vodík stal klíčovým prvkem v přechodu na udržitelnou energii, zejména v dopravním sektoru. Čerpací stanice na vodík (HRS - Hydrogen Refueling Stations) hrají zásadní roli v infrastruktuře pro vozidla poháněná vodíkovými palivovými články. Vodík jako palivo má velký potenciál, avšak jeho vlastnosti a technologie spojené s jeho skladováním a distribucí vyžadují důkladná bezpečnostní opatření.

Vodík má známé specifické vlastnosti, které vyžadují zvláštní pozornost v oblasti bezpečnosti na čerpacích stanicích:

1. **Extrémní hořlavost a výbušnost:** Vodík je vysoce hořlavý plyn a v kombinaci se vzduchem vytváří výbušné směsi již při nízkých koncentracích (4 % vodíku ve vzduchu). Díky své malé molekule je vodík obtížně detekovatelný lidskými smysly, a proto je nutné používat citlivé senzory a bezpečnostní systémy.
2. **Nízká hustota a snadná difúze:** Vodík je velmi lehký plyn, což znamená, že se rychle šíří a může snadno unikat i přes drobné netěsnosti. Na druhou stranu se díky své nízké hustotě v případě úniku rychle rozptýlí, což může omezit nebezpečí vzniku výbušných směsí.
3. **Nízká teplota hoření a neviditelný plamen:** Vodíkové plameny jsou téměř neviditelné, což může představovat výzvu pro záchranné složky při hašení požárů nebo odstraňování následků havárií.

Bezpečnostní opatření na čerpacích stanicích

Aby byly čerpací stanice na vodík bezpečné pro uživatele i okolí, jsou zaváděny přísné bezpečnostní standardy:

1. **Monitorovací systémy:** Moderní vodíkové stanice jsou vybaveny senzory na detekci úniků vodíku a monitorováním tlaku a teploty v jednotlivých částech systému. V případě odhalení úniku nebo abnormálních podmínek se automaticky spustí varovné signály a nouzové odstavení stanice.
2. **Ventilační systémy:** Aby se předešlo tvorbě výbušných směsí v případě úniku, jsou stanice navrženy s účinnými ventilačními systémy, které umožňují rychlé odvětrání uniklého vodíku.
3. **Zónování a ochranné bariéry:** Pro minimalizaci rizik spojených s potenciálními výbuchy jsou čerpací stanice navrhovány s bezpečnostními zónami, které oddělují skladovací oblasti, plnicí zóny a zóny pro uživatele.
4. **Přísné testování a certifikace:** Komponenty čerpacích stanic, včetně nádrží a ventilů, podléhají přísnému testování a musí splňovat mezinárodní normy a certifikace (např. ISO 19880 pro čerpací stanice na vodík).

Mezi klíčové bezpečnostní prvky patří:

- **Detektory vodíku:** Na stanici je obvykle rozmístěno více čidel detekujících přítomnost vodíku ve vzduchu (typicky v kontejneru kompresoru, v technologickém přístřešku zásobníků, uvnitř výdejního stojanu apod.). Detektory jsou nastaveny na alarm při koncentraci vodíku dosahující zlomku dolní meze výbušnosti (např. 10 % LFL, tj. ~0,4 % H₂ ve vzduchu). Při úniku a aktivaci alarmu automatika vypne kompresor, uzavře hlavní elektromagnetické ventily a spustí nouzovou ventilaci. Zvukový a vizuální alarm upozorní obsluhu.
- **Ventilační a odvětrávací systémy:** Uzavřené prostory s technologií (např. kontejner s kompresorem, elektrorozvodna) jsou vybaveny nucenou ventilací, která v případě detekce vodíku urychleně odsaje a naředí plyn. Větrání je navrženo tak, aby zabránilo akumulaci vodíku nad 1–2 % obj. v jakémkoli místě prostoru. Ventilační otvory jsou co nejvýše (vodík stoupá vzhůru) a s výdechem do bezpečného prostoru. Celkově musí být stanice koncipována co nejvíce jako otevřená – většina komponent (zásobníky, potrubí) je venku, pod přístřeškem, aby případný únik ihned unikl do atmosféry a nezadržoval se u stropu. V souladu s pravidly TPG 304 03 jsou všechny prostory, kde by se mohl hromadit uniklý vodík, buď trvale odvětrané, nebo opatřené detekcí a v návrhu je stanovena tzv. bezpečná vzdálenost.
- **Hasicí a tlaková ochrana:** Stanice mívá v kritických místech (kompresorová jednotka, elektroinstalace) instalovány automatické hasicí systémy nebo požární signalizaci. Někde se používá např. inertní plyn (CO₂) k zaplnění kompresorového boxu při požáru, čímž se uhasí případný začínající požár bez rizika znečištění vodíku (CO₂ nehasí přímo vodíkový plamen, ale snižuje teplotu a zabrání rozvoji požáru oleje či izolací). Důležitou součástí ochrany jsou tlakové pojistky – na všech tlakových nádobách a potrubích jsou přetlačné ventily či membrány, které při nadměrném tlaku (např. při poruše regulace) upustí plyn a zabrání prasknutí aparatury. Tyto uvolněné plyny jsou směřovány do bezpečného místa, často do vyústění do výšky (vent stack), aby se vodík rozptýlil vysoko nad stanicí případně bezpečně shořel mimo zařízení.
- **Nouzové vypnutí (ESH):** Na stanici jsou rozmístěna tlačítka Nouzový STOP, která v případě stisknutí ihned odpojí veškeré napájení technologie (s výjimkou bezpečnostních systémů), uzavrou hlavní uzavěry vodíku a zastaví kompresory. Tento stav vyžaduje obslužný reset a kontrolu, než je provoz obnoven. Tlačítka jsou jasně označena a přístupná (u výdejního stojanu, u vstupu do technologické části atd.).
- **Ochranné konstrukce a značení:** Fyzické oddělení nebezpečných částí – např. oplocení areálu stanice, nárazové bariéry okolo zásobníků a stojanů (chrání před nárazem vozidla), neiskřivé nástroje pro obsluhu. Samozřejmostí je zákaznická a bezpečnostní grafika: cedule „Zákaz kouření – Výbušná atmosféra – Riziko vznícení“ atd., aby bylo zřejmé, že v prostoru stanice nelze manipulovat s otevřeným ohněm, používat mobilní telefony (historicky kvůli jiskření, dnes spíše prevence nepozornosti) apod.

Celkově jsou vodíkové stanice navrženy tak, aby riziko vzniku nebezpečné situace bylo minimalizováno a v případě, že nastane (únik, požár), aby systémy automaticky uvedly zařízení do bezpečného stavu. Detailní požadavky na konstrukci a bezpečnost obsahují technické normy – v ČR zejména TPG 304 03 (Technická pravidla plynárenská pro vodíkové stanice) a dále evropská norma ČSN EN 17127 (Venkovní vodíkové čerpací stanice).

3.8. Požadavky na umístění a bezpečnostní vzdálenosti

Správné umístění vodíkové technologie a dodržení bezpečnostních vzdáleností je klíčové pro prevenci nehody s dopadem na okolí. Již při návrhu stanice či infrastruktury je nutné zohlednit okolní objekty, proudění vzduchu a možnost akumulace vodíku. Zásadní požadavky:

- **Venkovní umístění:** Zařízení vodíkové plnicí stanice by mělo být zpravidla ve venkovním prostoru. Otevřené prostranství zajišťuje, že případný uniklý vodík nebude mít tendenci se hromadit v nebezpečné koncentraci – stoupá volně vzhůru a ředí se v atmosféře. Proto se doporučuje instalovat zásobníky, kompresory i potrubí pod přístřešky s volným prouděním vzduchu, spíše než do uzavřených místností. Pokud jsou některé komponenty uvnitř budov či kontejnerů (např. elektrolyzátor v hale), musí být zajištěna dostatečná ventilace (přirozená i nucená) a detekce úniku vodíku. Vnitřní prostory se zařazují do příslušných zón s nebezpečím výbuchu (např. zóna 2 pro možné, ale nepravděpodobné úniky) dle ČSN EN 60079-10-1.
- **Bezpečnostní odstupy:** Technické předpisy definují tzv. *bezpečnou vzdálenost* – minimální vzdálenost mezi zdrojem nebezpečí (např. vodíkový zásobník, výdech odvětrání) a chráněným objektem (budova, veřejná komunikace, místo s výskytem osob), při které je riziko výbuchu či požáru akceptovatelně nízké. Tato vzdálenost se stanovuje na základě analýzy rizik a může být redukována, pokud jsou přítomna doplňková opatření (např. protipožární stěna mezi stanicí a objektem, stříška zabraňující hromadění plynu apod.). Konkrétní hodnoty bezpečnostních vzdáleností závisejí na množství vodíku, provozním tlaku a okolním prostředí. Obecně například Technická pravidla TPG 304 03 doporučují odstupy řádu jednotek až desítek metrů: typicky několik metrů od hranice pozemku či běžných objektů pro menší stanice, cca 15–20 m od citlivých objektů nebo vzduchotechnických nasávání pro větší instalace. Pro kapalný vodík jsou požadované vzdálenosti ještě vyšší (kvůli riziku rozlití a odpaření velmi studeného plynu – např. bezpečnostní vzdálenost kolem 20 m). V amerických standardech (NFPA 2 Hydrogen Code) se uvádí např. minimálně ~7,6 m odstup zásobníků stlačeného H_2 od budov a ~15 m od vstupů ventilace nebo el. zařízení, pokud nejsou splněny další podmínky [osha.gov](https://www.osha.gov). Důležité je rovněž umístění výdechů (ventilačních komínků) – ty mají vyústovat nad okolní zástavbu, aby se vodík rozptýlil bez možnosti vtáhnutí do budov. V praxi tedy návrh stanoví ochranné pásmo okolo stanice, kam se neumísťují např. kanceláře, zdroje zapálení apod. Typicky je to areál stanice plus několik metrů navíc. To je obdobné jako u čerpacích stanic CNG či LPG, kde

také existují odstupy nádrží od objektů (např. dle ČSN 65 0201 pro LPG nádrže min. 10 m od budovy).

- **Odolnost konstrukcí a oddělení:** V případě, že vodíková technologie je blízko jiných zařízení či staveb, mohou být instalovány ochranné stěny – např. protipožární zdi oddělit zásobníky od haly, čímž se snižuje nutný odstup (zeď zachytí tlakovou vlnu i sálavé teplo v případě nehody). Materiály v okolí vodíkových zařízení by měly být nehořlavé a odolné; např. zastřešení stanice z lehkého kovu nebo betonu. Zapuštěné prostory (kanály, šachty) nejsou ve stanici žádoucí, protože vodík by se v nich mohl shromažďovat – pokud jsou nutné, musí být intenzivně větrané. V okolí stanice se nesmí nacházet zdroje zapálení – např. otevřený oheň, kouření, ale i jiskřící elektrické přístroje. Proto se vytyčuje zóna, kde platí zákaz vstupu nepovolaným osobám a zákaz používání např. mobilů či jiných elektronických zařízení, která nejsou v nevýbušném provedení.
- **Integrace do urbanistického prostředí:** Při umístění veřejné vodíkové stanice je třeba zohlednit i únikové cesty a zónování dle stavebních předpisů. Stanice by měla být snadno přístupná hasiči, mít dostatek prostoru pro evakuaci v případě nehody a neměla by být umístěna v blízkosti zdrojů sálavého tepla či požáru (např. pod dráty vysokého napětí, vedle skladů hořlavin atd.). V praxi se vodíkové stanice často budují na okrajích areálů nebo průmyslových zón, kde je dostatek prostoru. Provozovatel musí v dokumentaci stanice (zejm. v Posouzení požárního nebezpečí podle vyhl. 246/2001 Sb.) prokázat, že umístění a provedení stanice splňuje požadované odstupy a neohrožuje okolí. Hasičský záchranný sbor posuzuje tyto aspekty v rámci stavebního řízení.

3.9. Detekce úniku vodíku

Detektory úniku vodíku jsou zásadním prvkem požární prevence ve vodíkových aplikacích. Vodík je bez zápachu a lidskými smysly neodhalitelný, proto je nutné spoléhat na senzory. Detektory bývají instalovány:

- V uzavřených či částečně uzavřených prostorech, kde může vodík unikat (např. motorový prostor autobusu, skříň palivových článků, garáže a dílny pro údržbu vozidel, kontejnery kompresorů na stanici, atd.).
- Ve vrchní části prostoru – vodík je lehký a stoupá nahoru, senzory tedy bývají u stropu či nad chráněným zařízením. Například v autobusové hale se doporučuje instalovat čidla vodíku na stropě (případně ve více úrovních, pokud jsou prostory členité).
- S nastavením dvoustupňové signalizace: První úroveň (např. při koncentraci 0,4 % H₂) vyhláší poplach a zahájí odvětrání, druhá, vyšší úroveň (např. 1–2 % H₂) spouští nouzové odstavení systémů a evakuaci. Tyto prahy jsou výrazně pod dolní mez výbušnosti (4 %), aby byl čas zasáhnout dříve, než vznikne nebezpečná směs.

Používané detektory mohou být katalytické (pelistorové), elektrochemické nebo polovodičové; v každém případě musí být certifikované pro detekci vodíku a pokud pracují v Ex prostředí, tak v nevýbušném provedení (dle ČSN EN 60079-29-1 pro detektory hořlavých plynů). Důležitá je také pravidelná kalibrace detektorů a kontrola jejich funkčnosti (viz kap. 8.2).

Ve vozidlech (např. autobusech) jsou detektory napojeny na palubní systém – v případě zjištění vodíku řidič dostane okamžité varování a systém může automaticky vypnout palivový článek, uzavřít nádrže a zapnout ventilaci. Obdobně na plnicích stanicích jsou detektory přímo propojeny s řídicí jednotkou: při poplachu se zastaví kompresory, uzavrou ventily a spustí výstražná signalizace.

3.10. Příklady nehod a jejich analýza

Databáze HIAD 2.0 obsahuje stovky incidentů, které zahrnují úniky vodíku, požáry, výbuchy i near-miss události. Největší podíl tvoří úniky bez zapálení, které se vyskytují přibližně v 55–60 % případů. Jedná se o klíčové předzvěsti vážnějších událostí. Jet fire je nejčastější scénář zapálení úniku a tvoří přibližně 18–22 % případů. Výbuchy oblaku (VCE) jsou méně časté, avšak mají nejvyšší potenciál způsobit destrukci konstrukcí, zejména v uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech. Near-miss události tvoří okolo 20 % záznamů a jejich podrobné vyhodnocení je zásadní pro prevenci.

Technické příčiny ztráty těsnosti zahrnují netěsná těsnění, selhání ventilů, materiálové křehnutí, chyby instalace, poruchy kompresorů a drift senzorů. Inženýrská interpretace ukazuje, že zpoždění detekce úniku může vést k vytvoření nebezpečné koncentrace vodíku během 30–120 sekund, pokud není účinně větráno. Nedostatečná ventilace je opakujícím se faktorem u těžkých incidentů. Z poruch detekční techniky vyplývá, že nedostatečná kalibrace senzorů způsobuje jejich výrazný drift, což může vést k neodhaleným únikům.

Název události	Rok / Země	Stručný popis	Iniciující událost	Fyzické účinky	Následky	Příčiny	Poučení / poznámky
Exploze vodíkové stanice Santa Clara	2019, USA	Nekontrolovaný únik z vysokotlaké části HRS → akumulace → exploze.	H ₂ uvolnění + zapálení	Exploze, požár	Škody na technologii, evakuace	Technická závada + lidský faktor	Nutné víceúrovňové kontroly spojů a TPRD
Výbuch stanice Uno-X Sandvika / Kjørbo	2019, Norsko	Vysokotlaká nádrž byla sestavena s montážní vadou → únik → výbuch.	H ₂ uvolnění + zapálení	Exploze	2 lehká zranění, velká škoda	Montážní chyba (špatná zátka)	Zavést 3-úrovňovou kontrolu vysokotlakých spojů

Název události	Rok / Země	Stručný popis	Iniciující událost	Fyzické účinky	Následky	Příčiny	Poučení / poznámky
Korejský vodíkový autobus – exploze	2019/2020, Jižní Korea	Exploze systému během provozu / tankování autobusu.	H ₂ uvolnění + zapálení	Exploze	Zničený autobus	Selhání kompozitní nádoby / ventilů	Kontrola životnosti nádrží typu IV, tlakové cykly
Kalifornie – požár vodíkového autobusu při tankování	2021, USA	Během tankování došlo k požáru na části střechy s nádržemi.	H ₂ uvolnění + zapálení	Požár	Zničení části vozidla	Selhání vysokotlaké armatury	Důraz na integritu střešních instalací
Bolzano Bus Case – Hexagon Type IV	2020, Itálie	Nehoda nebyla hlášena – jde o provozní case study nádrží typu IV.	–	–	–	–	Důležitý příklad správného návrhu a chlazení nádrží
Hydrogen cylinder leak – HRS	2012, USA	Únik 800 bar válce na střeše HRS, detekce, shutdown, bez zapálení.	Nezapálení + uvolnění H ₂	Bez zapálení	Evakuace	Selhání těsnění PTFE	Detekce = efektivní prevence VCE
PRD selhání – 300 kg release + flame	2012, USA	PRD na vysokotlaké trubici selhal, 300 kg uniklo a hořelo 2,5 h.	H ₂ uvolnění + zapálení	Jet fire	Evakuace, minimální škody	Selhání PRD	PRD musí mít redundantní bezpečnostní vrstvy
Vysokotlaký výbuch ve výrobě vodíku – Korea	2019, Korea	Výbuch v továrně na výrobu H ₂ , 6 mrtvých, 1 zraněný.	H ₂ uvolnění + zapálení	Exploze	Fatální událost	Nedostatečný proplach, kontaminace	Důsledná inertizace před provozem
Požár při testu palivových článků – laboratoř	2017, EU	Únik H ₂ během testu → zapálení → laboratorní požár.	H ₂ uvolnění + zapálení	Požár	Materiální škody	Nedostatečná ventilace / detekce	Ventilace a senzorika i v malých pracovištích
Hydrogen Power Plant Explosion – WHA International	2022, USA	Požár a exploze v elektrárně používající H ₂ jako chlazení turbogenerátorů.	H ₂ uvolnění + zapálení	Exploze, požár	Škody na elektrárně	Chyba tlakového spínače + těsnění	Izolace zdrojů + redundance ventilů

Název události	Rok / Země	Stručný popis	Iniciující událost	Fyzické účinky	Následky	Příčiny	Poučení / poznámky
Čchungdžu	2024, Čchungdžu (Jižní Korea)	Exploze vodíkového autobusu při plnění na stanici.	Možný únik H ₂ uvnitř a jiskra		Zadní část autobusu byla po natankování zničena výbuchem.	Technická závada na systému vozidla	Nutnost důkladné kontroly vozidel – zejména těsnosti palivových systémů a elektrických instalací
Bakersfield	2023, Bakersfield, USA	Požár vodíkového autobusu u plnicí stanice během plnění.	Možný elektrický zkrat v autobusu.	Vodík unikl řízeně a nevytvořil výbušný oblak.	Autobus shořel, část výdejního stojanu poškozena		Ověřila se funkčnost pasivní ochrany nádrží. Nutné ale řešit i elektrickou bezpečnost vozidel.
Busan	2024, Busan, Korea	Požár na H ₂ čerpací stanici	Únik H ₂		Požár, výbuchy	Únik z bezpečnostní pojistky	
Leuna	2024, Leuna Chemical Park, D	Únik H ₂ přečerpávacího traileru	únik	Výbuch + požár	H ₂ vyhořel		Kontrola stanic po celém D
Hydrogen Explosion at AAK Plant	2025, Louisville, USA	Exploze během použití vodíku ve zpracovatelském podniku	Chyby při manipulaci ve vysokotlakém zařízení	Výbuch	Úmrtí	Pravděpodobně křehkost	Přezkoumání průmyslových aplikací vodíku v potravinářském průmyslu

Z analýzy vyplývá, že nejúčinnější bezpečnostní strategií je prevence ztráty těsnosti, důsledná detekce vodíku, optimalizovaná ventilace a pravidelná kontrola kritických bezpečnostních prvků. Lidský faktor a organizační pochybení představují více než polovinu všech příčin incidentů.

Navzdory přísným bezpečnostním opatřením došlo v historii k několika nehodám na čerpacích stanicích na vodík. Analýza těchto incidentů ukazuje, že většina z nich byla způsobena lidskou chybou nebo technickou poruchou:

- **Případ v Norsku (2019):** V tomto roce došlo k výbuchu na čerpací stanici na vodík poblíž Osla. Vyšetřování ukázalo, že exploze byla způsobena netěsností v jedné z vysokotlakých nádrží, což vedlo k úniku vodíku a následné explozi.

- **Případ v Kalifornii (2020):** Zde došlo k explozi kvůli chybně instalovanému zařízení, které vedlo k úniku vodíku. Naštěstí zde nebyly žádné oběti, ale incident vedl k dočasnému uzavření několika stanic v regionu.

Ventilace a řízení koncentrace vodíku

Ventilace je nejúčinnějším pasivním bezpečnostním opatřením, protože minimalizuje dobu, během níž může vzniknout výbušná směs. Vodík má tendenci stoupat, a proto je nezbytné navrhnout větrací systémy tak, aby odváděly plyn z nejvyšších míst prostoru. Pokud se jedná o přirozené větrání, musí být otevíratelné plochy umístěny v horních částech místnosti a jejich celková plocha musí odpovídat nejvyššímu možnému úniku. Nucené větrání musí mít jasně definovanou kapacitu, výkon a směřování proudění tak, aby se zabránilo vzniku kapes vodíku pod stropem.

V uzavřených prostorech, jako jsou technické místnosti s palivovými články nebo vodíkové kotelny, musí být větrací systém vybaven logikou, která při detekci vodíku automaticky zvyšuje výkon ventilace. Ventilace musí být navržena tak, aby nedocházelo k turbulentnímu proudění, které může při zapálení zvýšit rychlost šíření plamene. Při návrhu větrání je nutné zohlednit i umístění potrubí, zařízení a složitost geometrie prostoru, protože výklenky, stropní podhledy nebo stísněné části mohou fungovat jako kapsy s vysokou koncentrací vodíku.

Rozeznáváme následující typy větrání a s tím spojené podmínky:

- **Přirozené větrání:** Konstrukce prostoru by měla umožňovat volný odchod vodíku vzhůru. To znamená otvory či mřížky ve stropní části, ventilátory směrem ven, světlíky atd. Normy uvádějí např. doporučení, že součet větracích otvorů má mít plochu aspoň $0,003 \text{ m}^2$ na 1 m^3 objemu místnosti. Tyto otvory by měly být umístěny co nejvýše a rovnoměrně.
- **Nucené větrání:** Kromě přirozených otvorů se instalují ventilátory pro aktivní odsávání. Ty jsou trvale zapnuté tam, kde je trvalý provoz (např. nabíjecí stanice baterií s odvodem vodíku – analogie s odvětráním H_2 z baterií), nebo se spouští automaticky při detekci zvýšené koncentrace. Výkon ventilace by měl zajistit aspoň několik výměn vzduchu za hodinu – doporučení se liší (např. americké NFPA kódy pro bateriové místnosti uvádějí min. 6–12 výměn/hod; pro vodíkové technologie obecně se volí takový výkon, aby koncentrace zůstala $< 1 \%$ obj.).
- **Směřování proudění:** Důležité je, aby ventilace nezpůsobovala vznik neodvětraných „kapes“. Např. v rozlehlé hale může být potřeba více odsávacích bodů. V garážích pro autobusy se někdy používá kombinace stropních průduchů a bočních odtahů. Pokud by vodík unikl z vozidla, stoupá ke stropu přímo nad ním – proto se doporučuje nad každým stáním mít lokální čidlo a odtah.
- **Odsávací komínky:** Jak již bylo zmíněno, některá zařízení mají vlastní odvětrávací vyústění (např. pojistné ventily). Ty musí být vyvedeny ven a nad střechy.

Dobře navržené větrání významně snižuje riziko výbuchu – uniklý vodík se nestačí soustředit v zápalné koncentraci. Například testy v simulovaných garážích ukazují, že i poměrně malý ventilační otvor (několik procent plochy stropu) dokáže udržet koncentraci hluboko pod mezi výbuchu i při kontinuálním úniku vodíku o větším průtoku. Pokud by přesto došlo k nahromadění vodíku (selhání ventilace), detekce by měla spustit alarm a zabránit jakékoli iniciaci (vypnutí elektřiny atd.).

Konstrukce tlakových systémů a integrita potrubí

Tlakové systémy pracující s vodíkem musí být navrženy v souladu s normami pro materiálovou kompatibilitu, aby odolávaly vodíkovému křehnutí. Trubky, potrubí, armatury a ventily musí být vyrobeny z materiálů, které mají definované vlastnosti v prostředí vodíku při daném tlaku a teplotě. Nedostatečná materiálová kompatibilita je častou příčinou poruch, které mohou mít katastrofální následky.

Potrubí musí být instalováno tak, aby se minimalizoval počet přírubových spojů, protože právě tyto spoje byly podle HIAD 2.0 jedním z nejčastějších míst úniku. Přednost by měla být dána svařovaným spojům, pokud je to možné. Konstrukce by měla umožnit přístup pro revize a detekci netěsností. Kompresory musí být vybaveny senzory vibrací a teploty, protože vibrace a přehřátí patří k nejčastějším příčinám poruch.

TPRD (Thermal Pressure Relief Device) – zařízení pro odlehčení tlaku

TPRD hrají zásadní roli při ochraně tlakových nádrží proti destruktivnímu selhání v důsledku zvýšené teploty. Nádrže pro vozidla na vodíkový pohon používají TPRD, které se musí aktivovat při definované teplotě a směřovat proud unikajícího plynu bezpečným směrem. Případy, kdy se TPRD neaktivovalo nebo bylo špatně orientováno, vedly podle analýzy incidentů k destrukci nádrží nebo k vážnému poškození vozidel i infrastruktury.

Návrh TPRD musí zohledňovat nejen spínací teplotu, ale i délku a orientaci výstupního potrubí, aby se zabránilo tomu, že proud plamene zasáhne osoby nebo důležité konstrukce. Všechny TPRD musí být pravidelně testovány a vizuálně kontrolovány, protože jejich selhání má potenciál způsobit extrémně vážné následky.

Bezpečnostní vzdálenosti a hazardní vzdálenosti

Bezpečnostní vzdálenosti jsou často stanoveny normami, jako je ISO 19880-1 nebo NFPA 2, ale v praxi je nutné je konfrontovat s konkrétním návrhem technologie. Pro vysokotlaké úniky je rozhodující tzv. hazardní vzdálenost, která se určuje podle očekávaného tepelně-radiačního výkonu proudového plamene nebo podle přetlaku výbuchu. Jet fire může způsobovat tepelné zatížení až 50 kW/m^2 , přičemž hranice 10 kW/m^2 se považuje za limit, kdy dochází ke vznícení hořlavých povrchů.

Modelová výpočtová vzdálenost pro jet fire se může pohybovat mezi třemi a patnácti metry, zatímco pro výbuchy v uzavřených prostorech je nutné počítat i s vyššími vzdálenostmi. Vždy je nutné provést inženýrskou analýzu podle typu zařízení, jeho výkonu, tlaku a umístění v prostoru.

Bezpečné havarijní odstavení technologie

Každá technologie využívající vodík musí mít definované scénáře havarijního odstavení. Tyto scénáře musí zahrnovat postupy pro uzavření přívodu vodíku, zastavení čerpadel a kompresorů, aktivaci ventilace a případné otevření TPRD. Všechny prvky systému havarijního řízení musí být navrženy podle principu fail-safe tak, aby při ztrátě napájení nebo jiné poruše došlo k přechodu zařízení do bezpečného stavu.

Organizační řízení bezpečnosti

Inženýrská bezpečnost musí být doplněna robustním provozním řízením. Klíčovým prvkem je jasné rozdělení odpovědností za provoz, údržbu a bezpečnostní dohled. Personál musí absolvovat odborné školení a pravidelná opakovací cvičení, která se zaměřují na pochopení fyzikálního chování vodíku, správných postupů při manipulaci a zásad bezpečnosti.

Zásadní je systém řízení změn, který zajišťuje, že každá změna parametrů technologie, typu zařízení nebo provozních podmínek je předem posouzena z hlediska rizik. Společnosti musí mít zavedený systém evidence incidentů a blížících selhání, které jsou dále analyzovány a jejich závěry promítány do praxe. Pravidelné audity bezpečnosti ověřují funkčnost technických systémů i to, zda je organizační bezpečnost účinně uplatňována.

Lidský faktor a prevence provozních chyb

Lidská chyba je jedním z nejčastějších zdrojů rizika podle analýz HIAD 2.0. Pro zajištění bezpečnosti je nutné nejen technické řešení, ale i vytvoření prostředí, které minimalizuje pravděpodobnost chyb. To zahrnuje jasné a přehledné provozní postupy, jednoduché a jednoznačné ovládací prvky, správně navrhované rozhraní člověk-stroj a pravidelné školení. Zaměstnanci musí být seznámeni s riziky spojenými s vodíkem, zejména s jeho tendencí k akumulaci pod stropem, nízkou energií zapálení a rychlými projevy požáru. Chyby vznikají nejen z neznalosti, ale také z časového tlaku, nevhodné pracovní kultury, nedostatečného dohledu, špatné komunikace nebo nejasných odpovědností. Minimalizace chyb proto vyžaduje nejen školení, ale i kulturu bezpečnosti, která podporuje důsledné dodržování postupů.

4. Závěr

Oblast využívání vodíku je velmi široká. Zahrnuje řadu oblastí průmyslu, energetiky a dopravy. Oblast dopravy je již více známa, neboť je jí věnována pozornost již delší dobu. Naším cílem bylo přinést základní náhled do oblasti problematiky bezpečnosti využívání vodíku, upozornit na největší již známé problémy. Určitě nemůžeme řešit veškeré technologie využívání vodíku, které se navíc neustále vyvíjejí.

Klíčovou roli hrají stále inovace a pravidelná kontrola infrastruktury. Je nezbytné klást důraz na neustálé zlepšování bezpečnostních systémů a přísné dodržování provozních standardů.

S postupným nástupem vodíkového hospodářství je vodík přítomný v širším spektru aplikací a na větším množství míst, než tomu bylo v minulosti. S tím je spojen statistický nárůst nehod. Počet závažných nehod s fatálními následky má klesající tendenci, což je také díky moderním bezpečnostním systémům a lepšímu řízení rizik.

5. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky

5.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s využíváním vodíku v České republice

1. Předpisy související s energetikou:

- **Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (energetický zákon)**
 - Tento zákon upravuje podmínky podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích, včetně plynárenství, kam se vodík může zařadit jako potenciální palivo.
- **Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií**
 - Tento zákon se zabývá efektivním využíváním energií a podporou obnovitelných zdrojů energie, kam vodík částečně spadá jako alternativní energetický zdroj. Obsahuje také pravidla pro energetickou účinnost a podporu inovativních technologií,
- **Zákon č. 271/2014 Sb. o energetické účinnosti**
 - Tento zákon podporuje zvyšování energetické účinnosti, což může zahrnovat i aplikace využívající vodík jako energetický nosič.

2. Předpisy související s ochranou životního prostředí:

- **Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší**
 - Reguluje emise z různých průmyslových procesů, což může zahrnovat i technologie využívající vodík.
- **Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon)**
 - Vodní zákon reguluje činnosti, které mohou mít vliv na vodní zdroje a ochranu životního prostředí, včetně provozů, které skladují nebo používají nebezpečné látky jako je vodík.
- **Zákon č. 17/1992 Sb. o životním prostředí**
 - Tento zákon stanovuje základní principy ochrany životního prostředí a může se vztahovat na projekty spojené s výrobou a využitím vodíku, především v oblasti hodnocení vlivů na životní prostředí (EIA).

- **Zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí**
 - Upravuje postupy pro posuzování vlivů různých projektů, včetně těch, které se týkají vodíkových technologií.
- **Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech**
 - V případě, že výroba nebo využívání vodíku generuje odpady, tento zákon upravuje jejich nakládání a ochranu před negativními dopady na životní prostředí.

3. Předpisy související s bezpečností:

- **Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně**
 - Stanovuje požadavky na požární bezpečnost při výrobě a skladování vodíku.
- **Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi**
 - Tento zákon se vztahuje na provozy, které nakládají s nebezpečnými látkami, jako je vodík. Stanovuje povinnosti pro provozovatele těchto zařízení ohledně prevence havárií a havarijních plánů.

4. Ostatní související předpisy:

- **Zákon č. 183/2006 Sb., stavební zákon**
 - Tento zákon reguluje výstavbu zařízení pro skladování vodíku, včetně získání příslušných stavebních povolení a dodržování technických a bezpečnostních norem.
- **Zákon č. 311/2006 Sb., o pohonných hmotách a o čerpacích stanicích**
 - Zákon upravuje podmínky pro činnosti spojené s distribucí pohonných hmot, včetně vodíkových čerpacích stanic, což je relevantní pro infrastrukturu skladování a distribuce vodíku pro dopravní účely.
- **Zákon č. 350/2011 Sb. o chemických látkách a chemických směsích**
 - Tento zákon reguluje manipulaci s chemickými látkami a směsmi, včetně vodíku, a stanovuje podmínky pro bezpečnou manipulaci, přepravu a skladování
- **Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně a vyhláška MV č. 246/2001 Sb., o požární prevenci:**
 - obecné předpisy požární ochrany se samozřejmě vztahují i na zařízení s vodíkem.
- **Vyhláška č. 133/2010 Sb., o požadavcích na pohonné hmoty:**
 - prováděcí předpis k zákonu 311/2006, který stanovuje kvalitativní parametry paliv. Pro vodík určený k pohonům odkazuje na technickou normu ČSN ISO 14687-2 (resp. nově ČSN EN 17124)

5.2. Přehled norem v oblasti využívání vodíku platných v České republice

ČSN ISO 19880-1: Plyný vodík – Čerpací stanice – Část 1: Obecné požadavky

- Tento dokument stanovuje minimální požadavky na návrh, instalaci, uvedení do provozu, provoz, kontrolu a údržbu pro zajištění bezpečnosti a tam, kde je to vhodné, pro zajištění provozu veřejných i neveřejných čerpacích stanic, které vydávají plyný vodík do lehkých silničních vozidel (např. elektrických vozidel s palivovými články).

ČSN ISO 19880-8: Plyný vodík – Čerpací stanice – Část 8: Kontrola kvality paliva

- Tento dokument stanovuje protokol pro zajištění kvality plyného vodíku v distribučních zařízeních a čerpacích stanicích pro palivové články silničních vozidel s technologií proton-výměnné membrány (PEM).

ČSN EN 17127: Venkovní výdejní vodíkové čerpací stanice na plyný vodík s plnicími protokoly

- Tento dokument definuje minimální požadavky na zajištění interoperability vodíkových čerpacích stanic, včetně protokolů o čerpání, které vydávají plyný vodík do silničních vozidel (např. elektrických vozidel s palivovými články), jež jsou v souladu s právními předpisy platnými pro tato vozidla.

ČSN EN 17124: Vodíkové palivo – Specifikace produktu a zajištění kvality pro čerpací stanice s výdejem plyného vodíku – Aplikace palivových článků s proton výměnnou membránou (PEM) pro vozidla

- Tento dokument specifikuje kvalitativní charakteristiky vodíkového paliva vydávaného na vodíkových čerpacích stanicích pro použití v systémech vozidel s palivovými články s protonovou výměnnou membránou (PEM) a odpovídající hlediska zajištění kvality pro zajištění jednotnosti vodíkového paliva.

ČSN ISO 14687: Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu

- Tento dokument specifikuje minimální kvalitativní charakteristiky vodíkového paliva, které se distribuuje pro využití v dopravních a stacionárních aplikacích.

ČSN 38 6405: Plynová zařízení, zásady provozu

- Norma platí pro obsluhu, provádění kontrol a revizí, vedení provozního deníku, zpracování místního provozního řádu a provoz plynových zařízení, včetně dovezených, provozovaných organizacemi. Norma obsahuje požadavky především na provádění obsluhy a oprav a (nejrozsáhlejší část) stanovuje společné bezpečnostní zásady vztahující se zejména na odvzdušňování, odplynění, meze výbušnosti, kontrolu ovzduší a zjišťování netěsností.

ČSN EN IEC 60079-0 ed. 5: Výbušné atmosféry – Část 0: Zařízení – Obecné požadavky.

- Tato norma stanoví všeobecné požadavky na konstrukci, zkoušení a označování Ex zařízení a Ex součástí, určených pro použití ve výbušných atmosférách.

ČSN EN IEC 60079-10-1 ed. 3: Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry

- Tato norma uvádí postupy pro zařazování nebezpečných prostorů, ve kterých může vznikat nebezpečí od hořlavých plynů nebo par a může být použita jako základ pro správný návrh, konstrukci, provoz a údržbu zařízení určených pro použití v nebezpečných prostorech. Norma je určena pro použití tam, kde může vznikat nebezpečí iniciace přítomných směsí hořlavých plynů a par se vzduchem.

ČSN EN 60079-14 ed. 4: Výbušné atmosféry – Část 14: Návrh, výběr a zřizování elektrických instalací.

- Tato norma obsahuje specifické požadavky pro navrhování, výběr, zřizování a výchozí revize elektrických instalací v nebezpečných prostorech nebo prostorech souvisejících s výbušnými atmosférami.
Pokud zařízení musí být vyhovující pro další podmínky okolí, například ochranu proti vnikání vody a odolnost proti korozi, mohou být nutné dodatečné metody ochrany. Požadavky této normy platí pouze pro použití elektrických zařízení v normálních atmosférických podmínkách.

ČSN 73 6060: Čerpací stanice pohonných hmot

- Tato norma platí pro ČS pohonných hmot (PH) a čerpací stanice zkapalněných ropných plynů (LPG) které jsou její součástí nebo se vyskytují v její blízkosti. Tato norma platí pro plnicí stanice H2.
Tato norma platí pro plnicí stanice a víceproduktové sdružené stojany pro prodej a výdej stlačeného zemního plynu (CNG), které jsou součástí čerpacích stanic pohonných hmot.
Tato norma platí pro dobíjecí stanice elektrických vozidel, které jsou součástí čerpacích stanic pohonných hmot dle

ČSN 650202: Hořlavé kapaliny. Plnění a stáčení výdejní čerpací stanice

- Norma platí pro projektování nových plnicích a stáčecích stanovišť hořlavých kapalin a topných olejů, výdejních čerpacích stanic s výdejními stojany nebo stáčecími a výdejními bloky a tankovacích stanic pro vnitrozemská plavidla a stanovišť základní konstrukční požadavky pro nově konstruované výdejní stojany. Platí dále pro projektování změn staveb nebo technologických zařízení plnicích a stáčecích stanovišť čerpacích a tankovacích stanic, a to pro měněné části objektů nebo technologických zařízení.

ISO 23273 – Palivové články silničních vozidel – Bezpečnostní specifikace – Ochrana před nebezpečím vodíkových vozidel poháněných stlačeným vodíkem

- Norma specifikuje základní požadavky na vozidla s palivovými články (FCV) s ohledem na ochranu osob a životního prostředí uvnitř i vně vozidla před nebezpečím souvisejícím s vodíkem. Platí pouze pro taková FCV, kde se jako palivo pro systém palivových článků používá stlačený vodík. Norma se nevztahuje na výrobu, údržbu a

opravy. Požadavky se týkají jak normálních provozních (bezporuchových), tak i jednorázových poruchových stavů vozidel.

6. Zdroje informací

1. B.L. Salvi, K.A. Subramanian, Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, 2015, Pages 1132-1155, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.030>.
2. Das LM. Safety aspects of a hydrogen-fuelled engine system development. Int J Hydrogen Energy 1991;16(9):619–24.
3. Nagalingam B, Duebel F, Schmillen K. Performance study using natural gas, hydrogen supplemented natural gas and hydrogen in AVL research engine. Int J Hydrogen Energy 1983;8(9):715–20.
4. Hansel JG, Mattern GW, Miller RN. Safety considerations in the design of hydrogen powered vehicles. Int J Hydrogen Energy 1993;18(9):783–90.
5. Changjong Kim, Sang Hoon Cho, Sung Min Cho, Youngseung Na, Sangwon Kim, Dong Kyu Kim, Review of hydrogen infrastructure: The current status and roll-out strategy, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 48, Issue 5, 2023, Pages 1701-1716, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.053>
6. Sun H., Li Z., Chen A., Zhang Y., Mei C. Current Status and Development Trend of Hydrogen Production Technology by Wind Power, 2019, Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society, 34 (19), pp. 4071 – 4083, DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180241
7. Swain M. Fuel leak simulation. Institute of Mechanical Engineers; 2004
8. <https://www.airproducts.com/company/sustainability/safetygrams>
9. www.eepowersolutions.com
10. www.copag.cz
11. www.apr.cz
12. www.hydroponder.eu
13. www.h2tools.org
14. www.sensidyne.com
15. www.clean-hydrogen.europa.eu
16. www.mobilityplaza.org

Název:	Bezpečnost při využívání vodíku
Autor:	prof. RNDr. Pavel Danihelka, CSc. Ing. Jan Koloničný, Ph.D. Ing. Kamila Kempná, Ph.D. Ing. Silvie Petránková Ševčíková, Ph.D.
Pracoviště:	Centrum energetických a environmentálních technologií Výzkumné energetické centrum
Místo, rok vydání:	Ostrava, 2025, 1. vydání
Počet stran:	38
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Neprodejné	

Tento průvodce obsahuje informace z oblasti bezpečnosti vodíku týkající se procesů a technologií jeho využívání. Za obsah této knihy jsou odpovědní autoři. Informace zde uvedené nejsou oficiálním stanoviskem orgánů Evropské unie. Poskytovatel dotace, Technologická agentura České republiky, není odpovědný za obsah tohoto sdělení.

ISBN 978-80-248-4852-5 (on-line)

DOI 10.31490/9788024848525