

Bezpečnost při výrobě 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 výrobě vodíku

Obsah

1. Úvod.....	4
2. Vlastnosti a nebezpečí vodíku.....	4
2.1. Základní vlastnosti vodíku	4
2.2. Přehled nebezpečí	4
3. Technologie pro výroby vodíku	8
3.1. Elektrolytické procesy.....	8
3.2. Termochemické procesy.....	9
3.3. Výroba vodíku využíváním zdrojů obnovitelné energie	10
3.4. Biologická výroba vodíku	11
3.5. Výroba vodíku za pomoci jaderné energie	11
3.6. Termická metoda	12
3.7. Srovnání různých technologií výroby vodíků.....	12
4. Legislativní a regulační požadavky.....	16
4.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s výrobou vodíku v České republice.....	16
4.2. Přehled norem platných v České republice	17
5. Řízení rizik a případové studie	19
5.1. Identifikované nebezpečné stavy a situace	19
5.2. Přehled rizik u jednotlivých technologií a návrhy na bezpečnostní opatření. 21	
5.3. Nehody s vodíkem	24
5.4. Závěry – poznatky a potřeby vyplývající z případových studií.....	41
6. Bezpečnostní opatření	43

6.1. Technická opatření	43
6.1.1. Požadavky na konstrukce	43
6.1.2. Odstupové a bezpečnostní vzdálenosti	44
6.1.3. Zařízení detekce hořlavých plynů a par	47
6.1.4. Detekce požáru	48
6.1.5. Ostatní požárně bezpečnostní zařízení	49
6.1.6. Větrání	49
6.1.7. Elektroinstalace	49
6.2. Organizační opatření	50
6.2.1. Doporučená školení	50
6.2.2. Kontroly a jejich frekvence	52
6.2.3. Zajištění kontinuity provozu po případné mimořádné události	53
6.2.4. Řízení odstávek a výpadků technologie	53
6.2.5. Údržba technologie a predikce selhání	54
6.2.6. Monitoring a bezpečnost provozu	54
6.2.7. Kybernetická bezpečnost a další informace	55
7. Závěr	56
8. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky	57
8.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s výrobou vodíku v České republice	57
8.2. Přehled norem platných v České republice	63
9. Bibliografické zdroje	67

1. Úvod

V současné době se využití vodíku věnuje pozornost jako energetické strategii šetrné k životnímu prostředí, která může, s využitím obnovitelných zdrojů, nahradit současnou výrobu energie z fosilních paliv.

Vodík je látka mající určité nebezpečné vlastnosti, kterou však lze bezpečně používat, pokud jsou nebezpečné vlastnosti dobře známy a rizika s nimi spojená řízeny. Aby se předešlo nehodám, a hlavně katastrofickým událostem, je nezbytné dodržovat postupy zaměřené na bezpečnost a dbát na zlepšení technologií, infrastruktur a strategií pro bezpečné využívání vodíku.

Navzdory všem možnostem preventivních opatření zcela "nulové" riziko není dosažitelné, a je třeba definovat, šířit a uplatňovat osvědčené postupy pro případy nehod a havárií. Cílem tohoto průvodce je proto poskytnout podporu bezpečnému využívání vodíku v regionu a minimalizaci rizik při zachování podpory inovací. Tento průvodce shrnuje také vybrané stavební podmínky z hlediska bezpečnosti při nakládání s vodíkem. Zaměřuje se rovněž na základní prvky, které jsou nejdůležitější z požárně bezpečnostního hlediska. Kromě technického zabezpečení se věnuje i organizačním opatřením, předcházejícím mimořádné události, i těm, kterým lze předejít větším ztrátám v souvislosti s kontinuitou provozu.

2. Vlastnosti a nebezpečí vodíku

2.1. Základní vlastnosti vodíku

Abychom lépe porozuměli nebezpečím, které mohou vzniknout v průběhu výroby vodíku, je nezbytné si definovat hlavní vlastnosti vodíku. Vodík je za standardní teploty a tlaku bezbarvý, bez zápachu, bez chuti, toxický, vysoce hořlavý dvouatomový plyn. Vodík má nízkou hustotu v důsledku čehož rychle stoupá a rozptyluje se, je 14x lehčí než vzduch. V případě úniku dochází v uzavřených prostorách k jeho kumulaci v nejvyšších místech, v blízkosti střechy. V důsledku nízké viskozity má vodík vysokou tendenci k úniku. Vodík je vysoce hořlavý s velkým rozsahem hořlavosti a nízkou zápalnou energií. Hlavní vlastnosti kapalného vodíku, která zvyšuje jeho rizikovost, je nízký bod varu. To způsobuje, že kapalný vodík je kryogenní kapalina a jeho bod varu je přibližně -252 °C při atmosférickém tlaku. Vodík má nejvyšší výhřevnost na jednotku hmotnosti a nejnižší na jednotku objemu. V porovnání s ostatními plyny se při uvolnění tlaku zahřívá. Tato charakteristika představuje určité riziko. Z bezpečnostního hlediska není vodík více nebo méně nebezpečný než jiná paliva, ale je jiný.

2.2. Přehled nebezpečí

Vodík se vyrábí především v plynném stavu, avšak v závislosti na potřebách se může dále zpracovávat do kapalného nebo vázaného stavu pro účely skladování, přepravy nebo specifických aplikací. V této části jsou popsána nebezpečí spojená s plynným a kapalným vodíkem.

Nebezpečí plynného vodíku

Únik vodíku a okamžité, nebo opožděné, vznícení hořlavé směsi vodíku a vzduchu nebo prasknutí tlakových nádob jsou potenciálně nebezpečné události.

V případě náhodného úniku plynného vodíku je třeba vzít v úvahu několik bodů, aby bylo možné posoudit příslušné důsledky:

- charakteristiky úniku: tlakový projev, velikost plamenů,
- prostředí: volné pole nebo uzavřený prostor,
- potenciální zdroje vznícení,
- v případě vznícení, jaké typy: okamžité nebo opožděné.

V jiných případech není únik obávanou událostí, ale vnější působení (např. tepelná, mechanická...) na tlakovou nádobu, uchovávající vodík, může vést k dramatickým následkům, jako je prasknutí/roztržení nádoby.

Uvolňování vodíku ve volném prostoru

V případě únik ve volném prostoru mohou nastat dva hlavní scénáře:

- **únik s okamžitou iniciací**

V tomto případě se uvolňující vodík okamžitě zapálí a shoří. Dokud se dále nezamezí unikání vodíku, vzniká tzv. jet fire. Následkem takové události je vývin tepla.

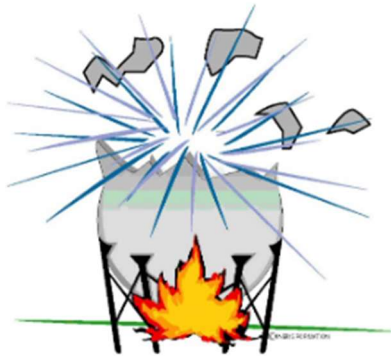


Obrázek 1: Ukázka jevu jet fire na LPG [foto z experimentů norského Sintef¹]

- **únik se zpožděnou iniciací**

Je-li zapálení zpožděno, před zapálením se vytvoří oblak hořlavých par. Vznícení těchto hořlavých par vyvolá explozi VCE (Vapor Cloud Explosion) s účinky přetlaku, s potenciálním ohrožením osob a zařízení v okolí.

¹ <https://www.sintef.no/contentassets/0c6cc3afd7cc40bc9a3a7e9eca370a57/sh2ift-welcome-and-intro-sintef.pdf>



Obrázek 2: Ukázka jevu VCE – po dostatečném nahřátí zkapalněné směsi v nádobě dochází k nárůstu tlaku a roztržení nádoby s následným únikem a iniciací plynu [autor Sintef²]

Uvolňování vodíku v uzavřených prostorech

Omezeným prostorem může být konkrétně kontejner, ve kterém probíhá proces nebo skladování vodíku, garáže, parkoviště, tunely.

Vodík uvolněný v uzavřeném prostoru může v případě úniku vést k akumulaci vodíku.

Mezi nebezpečí patří především:

- vznik hořlavé směsi, která by při vznícení mohla potenciálně hořet s nebezpečnými tlakovými a tepelnými účinky,
- zničení konstrukce, uzavřeného prostoru nebo budovy v důsledku zmíněných jevů,
- udušení, které může nastat v důsledku vytěsnění dýchatelného vzduchu vodíkem (vyčerpání kyslíku).

Prasknutí tlakové nádoby

Prasknutí tlakové nádoby je fyzický výbuch. Z určitých důvodů může dojít k degradaci odporu nádoby, která způsobí ztrátu kontejnmentu uloženého vodíku s rychlou expanzí, která generuje přetlakovou vlnu navíc k potenciálním úlomkům.

Výbuch může nastat:

za různých podmínek při normálním provozním tlaku (pracovním tlaku) v důsledku:

- degradace tlakové nádoby v čase (např. koroze, únava, křehnutí),
- mechanické nárazy na tlakovou nádobu,

při tlaku „roztržení“ (tlak při roztržení) v důsledku

- přeplnění,
- nedostatečné uvolnění tlaku,

² <https://www.sintef.no/contentassets/0c6cc3afd7cc40bc9a3a7e9eca370a57/sh2ift-welcome-and-intro-sintef.pdf>

- jiné události, jako je vnitřní výbuch nebo reakce, požár...
- Nebezpečí kapalného vodíku.

Vzhledem k vlastnostem kapalného vodíku, který je využíván v různých infrastrukturách a aplikacích jsou nebezpečné události ve většině případů, hodnoceny jako náhodné události ve volném prostředí.

V těchto případech se jedná především o masivní úniky kapalného vodíku např. v důsledku úplného a okamžitého protržení nádře – vedoucích k tvorbě potenciálního bazénu kapalného vodíku, se hlavní úniky – až po protržení celého potrubí – díky rychlému odpařování chovají spíše jako úniky studeného plynného vodíku.

Tabulka 1: Souhrn potenciálních nebezpečných událostí

Nebezpečná událost	Hlavní podmínky	Důsledky
1 - Prasknutí zásobníku při pracovním tlaku (Pw) (dopadající oheň / fragment)	100% plynný H ₂ - 10 bar – nádoba typu I	Přetlak a rozletění fragmentů
2 - Náhodná událost při skladování s kapalným H ₂ (požár) při 2Pw	Výbuch zásobníku kapalného H ₂ , zášlehový požár (jet fire)	BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) s tepelnými účinky
3 - Narušení skladovacího zařízení (protržení nebo proražení)	10 bar, * dvoufázové uvolňování pod tlakem * a/nebo kaluž kapalného H ₂ , odpařování tvoří hořlavou směs	Odpařování kaluže a tvorba kryogenního mraku s účinky přetlaku v důsledku vznícení hořlavé směsi
4 - Netěsnost potrubí mezi zásobníkem a čerpadlem	10 bar, kapalina * dvojfázové tlakové uvolňování * a/nebo kapalný H ₂ , odpařování tvoří hořlavý mrak	Chování takřka vysokotlakého proudu plynu s účinky přetlaku v důsledku vznícení
5 - Netěsnost potrubí mezi čerpadlem a odpařovačem	1000 bar, kapalina * dvoufázový tlakový únik, které se však chová jako vysokotlaký proud plynu	Chování téměř plynného vysokotlakého proudu s přetlakovými účinky v důsledku vznícení
6 - Protržení zásobníku při prasknutí tlakem (PR)	100% plynný H ₂ - 10 bar – nádoba typu I	Přetlak a rozletění fragmentů

Průběh uvolňování kapalného vodíku a tím související důsledky souvisí s počátečním tlakem, proto jsou v tabulce výše uvedeny podrobnosti o tlaku a stavu vodíku u jednotlivých událostí.

3. Technologie pro výroby vodíku

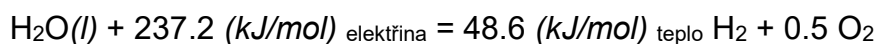
Vodík může být vyráběn různými technologiemi, včetně štěpení vody, jako je elektrolýza, termolýza a fotolýza, stejně jako prostřednictvím procesů využívajících biomasu, jako jsou biologické a termochemické technologie.

Z různých typů vodíku je pro plně udržitelnou přeměnu energetiky nejvhodnější obnovitelný vodík, tedy vodík vyráběný z obnovitelných zdrojů energie. Nejzavedenější technologií výroby obnovitelného vodíku je elektrolýza vody poháněná elektřinou z obnovitelných zdrojů. Elektrolýza vody je jednou z nejčastějších metod výroby vodíku, protože využívá obnovitelnou vodu a jako vedlejší produkt produkuje pouze čistý kyslík. Kromě toho proces elektrolýzy využívá stejnosměrný proud z udržitelných zdrojů energie, například ze slunce, větru a biomasy. Výroba obnovitelného vodíku elektrolýzou je v souladu s cestou „net-zero“, která umožňuje využívat synergie z propojení sektorů, čímž snižuje technologické náklady a poskytuje energetickému systému flexibilitu. Výroba vodíku elektrolýzou vody se těší zvýšenému zájmu.

Dále je uveden základní přehled a popis jednotlivých způsobů výroby vodíku, neboť je důležité mít základní informaci důležitou pro řešení konkrétních bezpečnostních otázek a postupů.

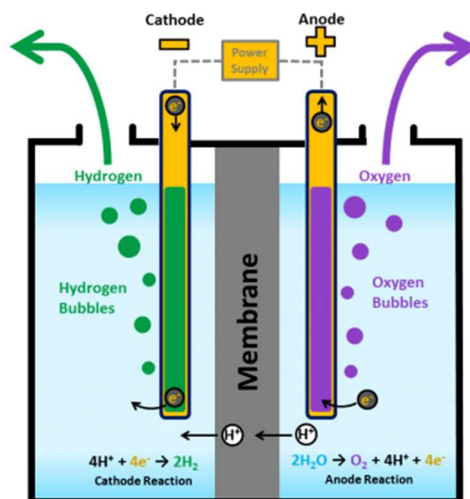
3.1. Elektrolytické procesy

Vodík vzniká elektrolýzou, elektrochemickou přeměnou vody na vodík a kyslík. Reakce může být vyjádřena jako:



Provoz elektrolyzátoru je přesně opačný než provoz palivového článku. Zatímco v palivových článcích reaguje kyslík a vodík za vzniku elektřiny a vody, v elektrolyzátoru se elektřina spotřebovává na rozklad vody na kyslík a vodík.

Obecně lze elektrolyzéry rozdělit do tří hlavních kategorií, a to na elektrolyzéry s protonovou výměnnou membránou (PEM), alkalické elektrolyzéry a elektrolyzéry s pevnými oxidy (SOEC). Tato kategorizace je založena na jejich elektrolytu. Dalšími již méně využívanými typy elektrolyzátorů jsou AEM elektrolyzéry - alkalická elektrolýza s polopropustnou membránou mezi katodou a anodou, a mikrobiální elektrolytické články (MEC) - využívají elektrochemické hydrogenace k přímé přeměně biologicky rozložitelného materiálu na vodík.

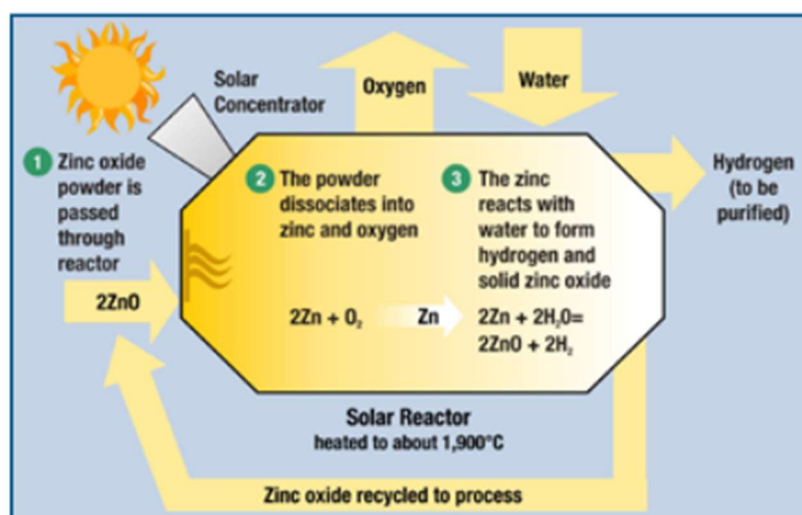


Obrázek 3: Proces výroby vodíku elektrolýzou [15]

3.2. Termochemické procesy

Výroba vodíku chemickými reakcemi zahrnuje interakci určitých chemických látek s vodou. Sérií reakcí se voda nakonec přemění na kyslík a vodík, zatímco chemické látky se vrací do svého původního stavu. Existují různé chemické sloučeniny, které mohou být využity v řetězci reakcí při výrobě vodíku [12]. Významnou roli při výrobě vodíku hrají různé tepelné cykly, včetně cyklů využívajících zemní plyn a uhlí. Některé tepelné procesy zahrnují uzavřené chemické cykly, které využívají teplo k výrobě vodíku z primárních zdrojů, jako je jodid síry a chlorid železa. Ani po výrobě vodíku prostřednictvím těchto reakcí však řada interakcí nekončí a je nutné sérii reakcí dokončit [13]. Cyklus jodidu síry je tepelný chemický cyklus používaný k výrobě vodíku. Síra se při vysoké teplotě kolem 850 °C rozkládá na kyslík, vodu a oxid siřičitý. Kyslík a oxid siřičitý se poté oddělí a oxid siřičitý reaguje s jodovou vodou za vzniku kyseliny sírové a vodíku. Kyselina sírová se oddělí a odstraní a zbývající vodík se zahřeje na teplotu přibližně 300 °C, čímž se přeruší vazby mezi vodíkem a jodem, a z vody se tak získá kyslík a vodík. Tento proces se opakuje recyklací kyseliny sírové a jódu použitých v reakci [14].

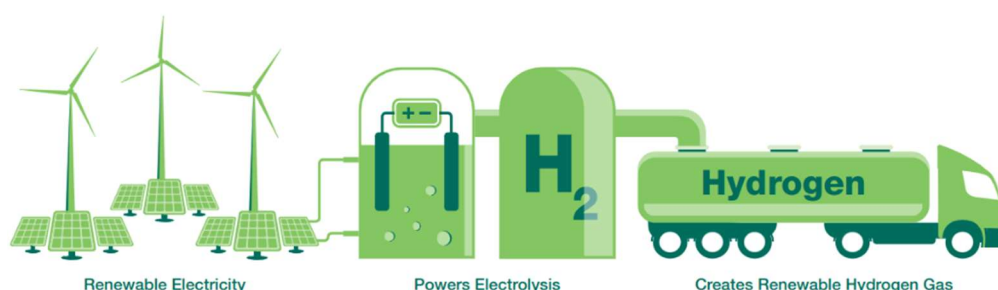
Nejčastější běžně používaný tepelný proces pro výrobu vodíku je parní reforming, viz Obrázek 4, kdy reaguje pára s uhlovodíkovým palivem při vysokých teplotách. Vodík je možné vyrábět z různých paliv vyrobených z uhlovodíků, včetně ropy, přírodního benzínu, nafty a udržitelných kapalných paliv, dřevěného uhlí nebo invazivní flóry. V současné době pochází 95 % veškeré výroby vodíku z technologie parního reformingu zemního plynu. [16].



Obrázek 4: Tepelný proces výroby vodíku – uzavřený chemický cyklus využívající oxid zinečnatý a sluneční energii [17]

3.3. Výroba vodíku využíváním zdrojů obnovitelné energie

Nejvíce využívanými obnovitelnými zdroji je energie větrná a sluneční. Vývoj technologií pro výrobu elektrické energie z těchto dvou zdrojů je neustále na vzestupu. Koncept Vodík v energetických systémech na venkově je ilustrativní schéma, které ukazuje, jak lze větrnou energii využít k výrobě elektřiny a vodíku. Uvedený koncept používá elektrolýzu k výrobě vodíku. Přebytná elektrická energie generovaná větrnými turbínami se využívá k napájení procesu elektrolýzy, při kterém vzniká vodíkový plyn, který lze skladovat pro pozdější použití. Tato metoda je považována za ekologicky šetrnou, protože neprodukuje žádné emise ani znečišťující plyny [18]. Elektrolýza vody pomocí solární energie je široce používanou metodou výroby vodíku, protože je nákladově efektivní a ekologicky přívětivá. Navíc je tato metoda považována za jeden z nejjednodušších způsobů, jak generovat vodík [18].

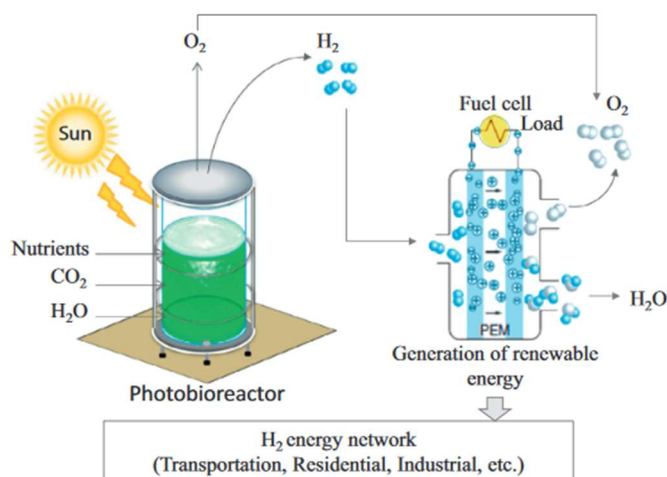


Obrázek 5: Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů

3.4. Biologická výroba vodíku

Biologická výroba vodíku je proces, při kterém se využívají biologické organismy nebo jejich enzymy k produkci vodíku. Mezi hlavní metody patří:

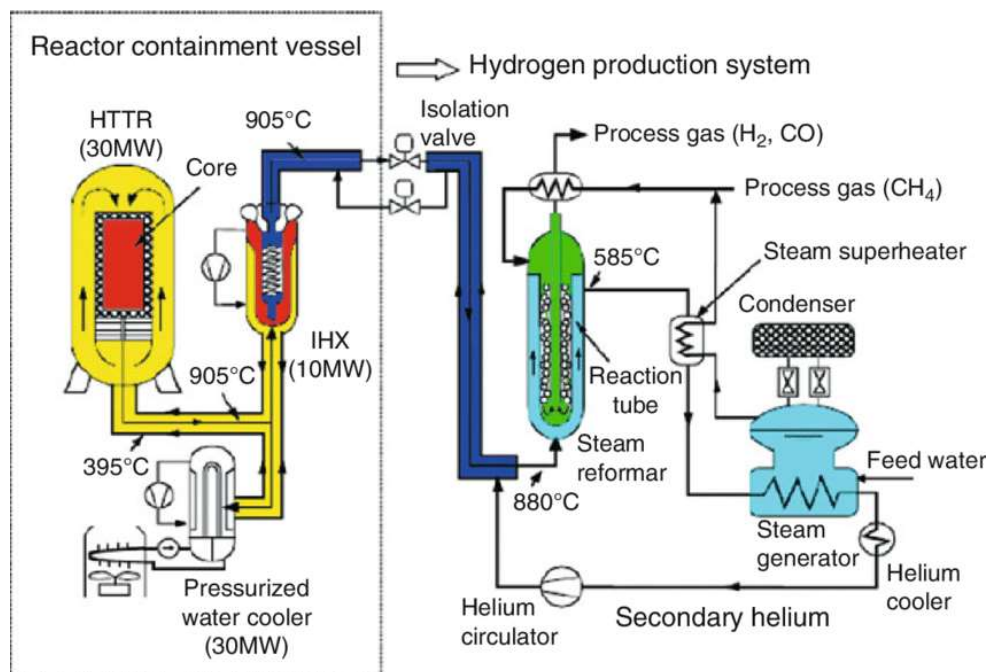
1. **Biofotolýza:** Fotosyntetické mikroorganismy, jako jsou sinice a zelené řasy, využívají sluneční energii k přímé produkci vodíku. Tento proces se děje za přítomnosti světla, kde mikroorganismy rozkládají vodu na kyslík a vodík.
2. **Fermentace:** Anaerobní bakterie rozkládají organické materiály, jako jsou cukry, za nepřítomnosti kyslíku, což vede k produkci vodíku a dalších vedlejších produktů, jako je kysličník uhličitý a organické kyseliny.
3. **Mikrobiální elektrolýza:** Mikroorganismy v kombinaci s elektrickým proudem rozkládají organické látky na vodík. Tento proces využívá bioelektrochemické systémy, kde bakterie oxidují organické látky a produkují elektrony, které jsou následně využity k elektrolýze vody.
4. **Fotodegradace organických látek:** Některé fotosyntetické bakterie mohou rozkládat organické látky na vodík pomocí světelné energie. Tento proces zahrnuje rozklad organických sloučenin, jako jsou mastné kyseliny, pomocí světla a specifických enzymů.



Obrázek 6: Fotobiologická výroba obnovitelné vodíkové energie z mikrořas [20]

3.5. Výroba vodíku za pomoci jaderné energie

V posledních letech vědci zkoumají metodu nazvanou jaderná reakce k výrobě vodíku bez emisí skleníkových plynů, jak je znázorněno na Obrázku 7. Tato metoda vyžaduje zvýšení toků tepla a spotřebovává méně elektřiny. I když výroba vodíku elektrolýzou vody pomocí elektřiny není tak efektivní, je to ekologičtější a udržitelnější řešení z dlouhodobého hlediska. Nicméně, tradiční metody elektrolýzy vyžadují teploty kolem 850 °C a větší množství elektrické energie, což je důležitý bod pro rozvoj technologie jaderné energie z hlediska nákladů a udržitelnosti [23].



Obrázek 7: Výroba vodíku prostřednictvím jaderné energetiky [21]

3.6. Termická metoda

Tato metoda výroby vodíku zahrnuje termální rozklad vody, což lze dosáhnout dvěma způsoby. První metodou je zahřívání vody na velmi vysokou teplotu, nad 2500 °C, což způsobí její rozpad na kyslík a vodík. Nicméně, k dosažení významného množství vodíku touto metodou jsou potřeba vysoké teploty a materiály, které dokážou snášet takové teplo, což činí tento proces nákladným a obtížně realizovatelným. Výsledkem je, že tento proces není často považován za žádoucí [24]. Voda je zahřívána na teplotu přibližně 5000 °C pomocí procesu plazmového oblouku, což způsobí její rozklad na jednotlivé produkty a procento výroby vodíku v tomto procesu se odhaduje na přibližně 50 % jeho objemu. Tento proces je považován za velmi drahý ve srovnání s jinými metodami výroby vodíku [25].

3.7. Srovnání různých technologií výroby vodíků

Výrobu vodíku lze rozdělit podle různých faktorů, jako jsou výrobní podmínky, typ použitých zdrojů (obnovitelné nebo fosilní), logistické faktory a variabilní náklady, viz.

Tabulka 2 znázorňuje různé výrobní metody a s nimi spojené náklady.

Tabulka 2: Srovnání technologií a s nimi spojených nákladů

Technologie produkce vodíku	Výhody	Nevýhody	Účinnost [%]	Náklady [\$ /kg]	Náklady [tCZK/t]
Parní reforming	Nejběžněji využívaná metoda. Využívá stávající infrastrukturu	Produkce CO, CO ₂ Nestabilní zásobování	74–85	2.27	51,1
Částečná oxidace	Zavedená technologie	Spolu s výrobou H ₂ , produkuje těžké oleje a ropný koks	60–75	1.48	33,3
Autotermní reforming	Dobře zavedená technologie a stávající infrastruktura	Produkuje CO ₂ jako vedlejší produkt, využívá fosilní paliva	60–75	1.48	33,3
Bio fotolýza vody	Spotřebává CO ₂ , produkuje O ₂ jako vedlejší produkt, pracující za mírných podmínek.	Nízká produkce H ₂ , potřeba slunečního světla, potřeba velkého reaktoru, citlivost na O ₂ , vysoká cena materiálu.	10–11	2.13	47,9
Tmavá fermentace	Jednoduchá metoda, H ₂ vyrobený bez světla, bez omezení O ₂ , CO ₂ -neutrální, zahrnuje recyklaci odpadu.	Eliminace mastných kyselin, nízká produkce H ₂ , nízká účinnost, nutnost velkého objemu reaktoru	60–80	2.57	57,8
Foto Fermentace	Zahrnuje recyklaci odpadních vod, využívá různé organické odpadní vody, CO ₂ neutrální.	Nízká účinnost, nízká produkce H ₂ , potřeba slunečního světla, nutnost velkého objemu reaktoru, citlivost na O ₂	0.1	2.83	63,7
Zplyňování	Dostatek levných surovin a neutrální CO ₂ .	Kolísající výtěžnost H ₂ z důvodu nečistot v surovině, sezónní dostupnosti a tvorby dehtu.	30–40	1.77–2.05	39,8–46,1

Pyrolýza	Dostatek levných surovin a neutrální CO ₂ .	Tvorba dehtu, kolísající množství H ₂ v důsledku nečistot v surovině a sezónní dostupnosti.	35–50	1.59–1.70	35,8–38,2
Termolýza	Čistá a udržitelná technologie, vedlejší produkt O ₂ , dostupné suroviny.	Vysoké investiční náklady, toxicita prvků, problémy s korozí.	20–45	7.98–8.40	179,6–189,0
Fotolýza	O ₂ jako vedlejší produkt, dostatek surovin, žádné emise.	Nízká účinnost, neúčinný fotokatalytický materiál, vyžaduje sluneční světlo.	0.06	8–10	180,0–225,0
Elektrolýza	Zavedená technologie, nulové emise, využívá stávající infrastrukturu, O ₂ jako vedlejší produkt	Problém se skladováním a přepravou.	60–80	10.30	231,8

4. Legislativní a regulační požadavky

Výroba vodíku v České republice je regulována souborem legislativních předpisů, které pokrývají různé oblasti, od energetiky a životního prostředí po bezpečnost nebo výstavbu. Celkový přehled, včetně relevantních částí jednotlivých předpisů představuje Příloha A – Legislativní a regulační požadavky. Stručný přehled dotčených legislativních a normativních požadavků je uveden v následujících kapitolách – stav v 2. pol. r. 2024. Detailní přehled je uveden v příloze A tohoto průvodce.

4.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s výrobou vodíku v České republice

1. Předpisy související s energetikou:

- **Zákon č. 458/2000 Sb., Energetický zákon:** Upravuje podnikání v energetických odvětvích, včetně výroby energie z obnovitelných zdrojů.
 - *Zařízení na výrobu vodíku, pokud využívá obnovitelné zdroje energie nebo je součástí širšího energetického systému, může podléhat specifickým licenčním a povolovacím podmínkám. Pokud je vodík produkován z obnovitelných zdrojů, lze využít podporu a regulace spojené s obnovitelnou energií, včetně energetických společenství.*
- **Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie:** Stanoví podmínky pro podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, včetně vodíku.
 - *Vodík vyrobený z elektřiny z obnovitelných zdrojů může být certifikován a podléhat zárukám původu, což je důležité pro obchodní aspekty výroby vodíku.*

2. Předpisy související s ochranou životního prostředí:

- **Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci:** Definuje povinnosti provozovatelů zařízení, včetně výroby vodíku jako součásti chemického průmyslu.
 - *Při stavbě a provozu výrobního zařízení na vodík je povinné získat integrované povolení, které zahrnuje environmentální a provozní požadavky. Vodík jako chemická látka spadá do kategorie průmyslové výroby, což vyžaduje podrobné hodnocení vlivů na životní prostředí.*
- **Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí:** Vyžaduje posouzení vlivů výroby vodíku na životní prostředí.
 - *Nová zařízení na výrobu vodíku podléhají procesu EIA, který zajišťuje, že provoz nebude mít negativní dopad na životní prostředí.*
- **Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší:** Reguluje znečištění ovzduší a stanovuje limity pro emise.

- *Zařízení na výrobu vodíku musí splňovat emisní limity stanovené tímto zákonem, což zahrnuje také kontrolu emisí skleníkových plynů a dalších znečišťujících látek.*

3. Předpisy související s bezpečností:

- **Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně:** Stanovuje požadavky na požární bezpečnost při výrobě a skladování vodíku.
 - *V rámci stavebních a provozních plánů musí být zahrnuty požadavky na požární ochranu, včetně instalace požárně bezpečnostních zařízení a školení zaměstnanců.*
- **Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií:** Upravuje prevenci havárií při manipulaci s nebezpečnými látkami, včetně vodíku.
 - *Provozovatelé zařízení na výrobu vodíku musí vypracovat a implementovat bezpečnostní program zaměřený na prevenci závažných havárií, včetně tvorby vnitřních a vnějších havarijních plánů.*

4. Předpisy související s výstavbou:

- **Zákon č. 283/2021 Sb., Stavební zákon:** Upravuje plánování a výstavbu zařízení pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů, včetně vodíku.
 - *Výstavba zařízení na výrobu vodíku podléhá stavebnímu povolení, které zohledňuje specifické požadavky na umístění a stavební bezpečnost takového zařízení.*
- **Vyhlášky a nařízení vlády:** Stanovují požadavky na bezpečný provoz a údržbu technických zařízení, jako jsou tlakové, plynové a elektrické systémy používané při výrobě vodíku.
 - *Vzhledem k povaze vodíku jako vysoce výbušné látky je nutné přijmout specifická opatření pro zajištění bezpečnosti pracovníků i celého provozu.*

4.2. Přehled norem platných v České republice

ČSN EN IEC 60079-0 ed. 5 (332320): Výbušné atmosféry – Část 0: Zařízení – Obecné požadavky.

ČSN EN 60079-10-2 ed. 2 (332320): Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plyné atmosféry.

ČSN EN 60079-14 ed. 4 (332320): Výbušné atmosféry – Část 14: Návrh, výběr a zřizování elektrických instalací.

ČSN EN 60079-17 ed. 4 Výbušné atmosféry - Část 17: Revize a preventivní údržba elektrických instalací

ČSN EN 60079-32-2 – Výbušné atmosféry – Část 32-1: Nebezpečí od statické elektřiny-zkoušky

ČSN EN ISO/IEC 80079-20-1 - Výbušné atmosféry - Část 20-1: Materiálové vlastnosti pro klasifikaci plynů a par - Zkušební metody a data

ČSN EN ISO 80079-36 – Výbušné atmosféry - Část 36: Neelektrická zařízení pro výbušné atmosféry - Základní metody a požadavky

ČSN EN 1127-1 ed. 3 – Výbušná prostředí - Prevence a ochrana proti výbuchu - Část 1: Základní koncepce a metodika

ČSN 73 0804: Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty

ČSN 73 0875: Požární bezpečnost staveb – Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení

ČSN ISO 14687: Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu

ČSN EN ISO 17268 (656521): Plynný vodík – Plnicí rozhraní pozemních vozidel

ČSN EN ISO 6974-6: Zemní plyn – Stanovení složení s definovanou nejistotou pomocí plynové chromatografie – Část 6: Stanovení vodíku, hélia, kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého a uhlovodíků C1 až C8 pomocí tří kapilárních kolon

ČSN 38 6405: Plynová zařízení, zásady provozu

ČSN 33 2000-1 ed. 2. - Elektrické instalace nízkého napětí - Část 1: Základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice

ČSN 33 2000-5-51 ed. 3+Z1+Z2 - Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení – Všeobecné předpisy

ČSN EN ISO 19353 (833251): Bezpečnost strojních zařízení – Požární prevence a požární ochrana

ČSN EN 61140 ed. 3 - Ochrana před úrazem elektrickým proudem - Společná hlediska pro instalaci a zařízení

ČSN EN 1991-1-4 ed. 2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem

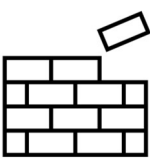
ČSN EN 1991-1-5 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou

ČSN EN 62305-1: Ochrana před bleskem – část1: Obecné principy

5. Řízení rizik a případové studie

Sumarizace hlavních nebezpečí s návaznými protipatřeními, které jsou dále rozpracovány v tomto průvodci, shrnuje Tabulka 3.

Tabulka 3: Přehled hlavních nebezpečí vodíku s návaznými protipatřeními

Vodík má velmi nízkou zápalnou energii . Úniky, například z přírub potrubí, jsou obzvláště nebezpečné, protože tření způsobené samotným únikem může být zdrojem vznícení.		Kontroly těsnosti potrubí a spojů.
V případě úniku a vznícení může vodík za určitých okolností hořet neviditelným plamenem . Sálavé teplo z tohoto plamene je výrazně nižší než u běžných uhlovodíkových plamenů, což zvyšuje riziko pro personál, protože plamen nemusí být snadno detekovatelný.		Instalace infračervených nebo ultrafialových detektorů plamene pro zvýšení bezpečnosti.
Vodík je vysoce hořlavý v širokém rozsahu koncentrací a za vhodných podmínek může dokonce detonovat.		Dodržování bezpečnostních opatření (větrání, eliminace iniciačních zdrojů)
Při zvýšených teplotách se molekula vodíku může disociovat na ionty. Ty mohou difundovat nebo být absorbovány do kovových materiálů, což může vést k tzv. vodíkové křehkosti zařízení a potrubí.		Pravidelné inspekce, používání vhodných materiálů.

5.1. Identifikované nebezpečné stavy a situace

Jsou popsány základní typy známých nebezpečných situací při různých, ale již rozvinutějších, způsobech/technologiích výroby vodíku.

Vysoké provozní teploty a tlaky

- **Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC):** Tyto systémy pracují při extrémně vysokých teplotách (500-1000°C), což zvyšuje riziko tepelných nebezpečí, včetně požárů a explozí, pokud dojde k narušení systému. Vysoké teploty také

vyžadují použití speciálních materiálů odolných vůči teple, které by mohly selhat, pokud nejsou řádně udržovány.

- **PEM elektrolyzéry:** I když obecně pracují při nižších teplotách (20-80°C), PEM elektrolyzéry mohou generovat vodík při vysokých tlacích (až 200 barů). Systémy s vysokým tlakem vodíku představují významná rizika kvůli možnému úniku nebo prasknutí, což může vést k výbuchovým atmosférám.

Koroze a degradace materiálů

- **Alkalické elektrolyzéry:** Tyto systémy používají vysoce korozivní hydroxid draselný (KOH) nebo hydroxid sodný (NaOH) jako elektrolyty. Korozivní povaha těchto látek může časem vést k degradaci materiálů, čímž se zvyšuje riziko úniků a selhání. Pokud nejsou řádně zajištěny, tyto korozivní látky mohou způsobit vážné škody a představovat významné zdravotní riziko.
- **PEM elektrolyzéry:** I když jsou méně korozivní než alkalické systémy, PEM systémy stále čelí problémům s degradací materiálů, zejména s použitím drahých katalyzátorů, jako jsou platina a iridium, které se časem degradují, což vede k neefektivnosti a potenciálnímu selhání.

Únik plynů a jejich smíchání

- **Alkalické elektrolyzéry:** Tyto systémy mají významný problém se smícháním plynů, kdy se vodík a kyslík produkované na elektrodách mohou smíchat, pokud dojde k selhání membrány, která je odděluje. To může vytvořit vysoce výbušnou směs, zejména v přítomnosti jiskry nebo zdroje tepla.
- **PEM elektrolyzéry:** I přes pevnou povahu elektrolytu stále existuje riziko smíchání plynů, zejména pokud je membrána poškozena. Toto riziko se zvyšuje při vysokých tlacích, kde se zvyšuje možnost úniku.

Nebezpečí při skladování a přepravě

- **Skladování vodíku:** Vodík, zejména při skladování pod vysokým tlakem, nebo v kapalném stavu, je vysoce hořlavý a může vést k katastrofálním explozím, pokud není správně manipulován. Malá velikost molekul vodíku je činí náchylnými k únikům, které mohou být obtížně detekovatelné a zvládnutelné.
- **Přeprava:** Přeprava vodíku, ať už jako plyn nebo kapalina, zahrnuje rizika spojená s úniky, nárůstem tlaku a potenciálními zdroji zapálení. Pro zmírnění těchto rizik jsou nutné speciální postupy pro manipulaci a skladování.

Složitost a novost systémů

- **Mikrobiální elektrolyzéry (MEC):** Tyto systémy jsou stále ve fázi výzkumu a vývoje a zahrnují složité biochemické procesy. Složitost systému zavádí nejistoty v oblasti provozní bezpečnosti, zejména pokud jde o dlouhodobou stabilitu použitých materiálů a kontrolu mikrobiální aktivity.

- **Elektrolyzéry s aniontovou výměnnou membránou (AEM):** Tyto systémy, které jsou stále ve vývoji, vyžadují další výzkum stability membrán a katalyzátorů. Nedostatek rozsáhlých provozních zkušeností zvyšuje nejistotu a možnost neočekávaných selhání.

Ekologická a zdravotní rizika

- **Manipulace s toxickými materiály:** Některé typy elektrolyzérů, zejména SOEC, vyžadují materiály, které mohou být toxické nebo nebezpečné, například yttriem stabilizovaná zirkonie (YSZ). Nesprávná manipulace nebo likvidace těchto materiálů může vést ke kontaminaci životního prostředí a zdravotním rizikům.

Potenciál pro rychlou degradaci systému

- **SOEC:** Vysoké provozní teploty v systémech SOEC mohou vést k rychlé degradaci materiálů, což může vést k selhání systému. Mechanické napětí způsobené tepelnými cykly, delaminace kyslíkové elektrody a tvorba sekundárních fází mohou ohrozit integritu systému.

5.2. Přehled rizik u jednotlivých technologií a návrhy na bezpečnostní opatření

Tabulka 4 konkretizuje jednotlivá rizika u základních technologií výroby vodíku, včetně návrhů bezpečnostních opatření.

Tabulka 4: Přehled rizik a opatření pro jednotlivé technologie výroby vodíku

Název technologie	Riziko	Opatření
Parní reforming zemního plynu	• Výbuch a požár: Vodík a metan jsou vysoce hořlavé a mohou vést k výbuchům. • Únik plynu: Možnost úniku zemního plynu nebo vodíku může vést k nebezpečí výbuchu a otravy. • Vysoké teploty a tlaky: Procesy probíhají při vysokých teplotách a tlacích, což zvyšuje	• Detekční systémy: Instalace senzorů na detekci úniku plynů a systémů pro automatické vypnutí v případě detekce. • Izolace procesů: Použití bezpečnostních uzávěrů, ventilů a izolačních zařízení ke kontrole a izolaci různých částí výrobního procesu. • Regulace tlaku a teploty: Použití spolehlivých systémů

	riziko mechanických selhání a nehod. • Emise CO₂: Výroba vodíku ze zemního plynu produkuje značné množství oxidu uhličitého, přispívajícího k emisím skleníkových plynů.	pro regulaci a monitorování tlaku a teploty v reaktorech a dalších zařízeních. • Zachytávání CO₂: Implementace technologií pro zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (CCS) ke snížení emisí.
Elektrolýza vody	• Elektrická rizika: Elektrolýza vyžaduje vysoké napětí a proud, což může vést k riziku úrazu elektrickým proudem. • Únik vodíku: Vodík je vysoce hořlavý a únik může vést k výbuchu. • Koroze a degradace: Elektrody a další části zařízení mohou podléhat korozi a degradaci, což může vést k selhání systému.	• Ochrana před elektrickým proudem: Použití izolovaných vodičů a ochranných prvků pro snížení rizika elektrických úrazů. • Detekční systémy: Instalace senzorů na detekci úniku vodíku a systémů pro automatické vypnutí. • Pravidelná údržba: Pravidelná kontrola a údržba elektrolyzérů a souvisejících zařízení, včetně výměny opotřebovaných částí. • Materiály odolné vůči korozi: Použití materiálů odolných vůči korozi a degradaci.
Biologická produkce vodíku	• Kontaminace: Riziko kontaminace mikroorganismů, což může ovlivnit výtěžnost a bezpečnost procesu. • Únik bioplynu: Možnost úniku	• Sterilní podmínky: Udržování sterilních podmínek a pravidelné monitorování mikrobiální kultury. • Detekční systémy: Instalace senzorů na

	bioplynu, který může být hořlavý nebo toxický. • Nevhodné podmínky pro mikroorganismy: Nesprávné podmínky (teplota, pH) mohou vést k úhynu mikroorganismů a ztrátě produkce.	detekci úniku bioplynu. • Optimalizace podmínek: Pravidelné monitorování a regulace podmínek (teplota, pH) pro optimální růst a aktivitu mikroorganismů.
Pyrolýza a termochemické cykly	• Vysoké teploty: Procesy vyžadují extrémně vysoké teploty, což zvyšuje riziko požáru a popálenin. • Úniky plynů: Možnost úniku toxických nebo hořlavých plynů. • Chemická rizika: Použití a manipulace s chemikáliemi mohou představovat riziko pro zdraví a bezpečnost.	• Ochranné vybavení: Důsledná tepelná izolace technologie, použití osobních tepluvzdorných ochranných prostředků (OOP) • Izolace a ventilace: Zajištění správné izolace zařízení a dostatečné ventilace pro odvádění plynů. • Chemické bezpečnostní protokoly: Dodržování přísných bezpečnostních protokolů při manipulaci s chemikáliemi a skladování nebezpečných látek.

Obecná opatření pro zajištění bezpečnosti ve výrobním procesu

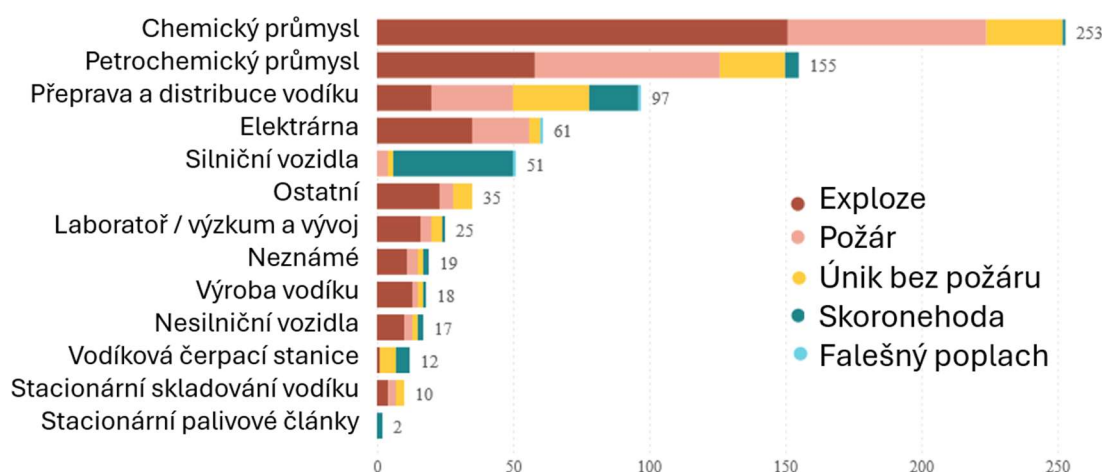
Mezi základní opatření/postupy pro zvýšení bezpečnosti technologií výroby vodíku patří:

- Bezpečnostní standardy a regulace: Dodržování přísných bezpečnostních norem a regulací stanovených průmyslovými a vládními organizacemi.

- Automatizace a kontrola: Implementace automatizovaných systémů řízení a kontroly, které minimalizují lidské chyby a umožňují rychlou reakci na anomálie.
- Vzdělávání a školení: Pravidelné školení zaměstnanců v oblasti bezpečnosti a manipulace s vodíkem.
- Nouzové plány: Vytvoření a pravidelná aktualizace nouzových plánů pro případ nehody, včetně evakuace, hašení požárů a řízení úniků.
- Pravidelné inspekce: Provádění pravidelných inspekcí a údržby zařízení k zajištění jejich správné funkce a bezpečnosti.

5.3. Nehody s vodíkem

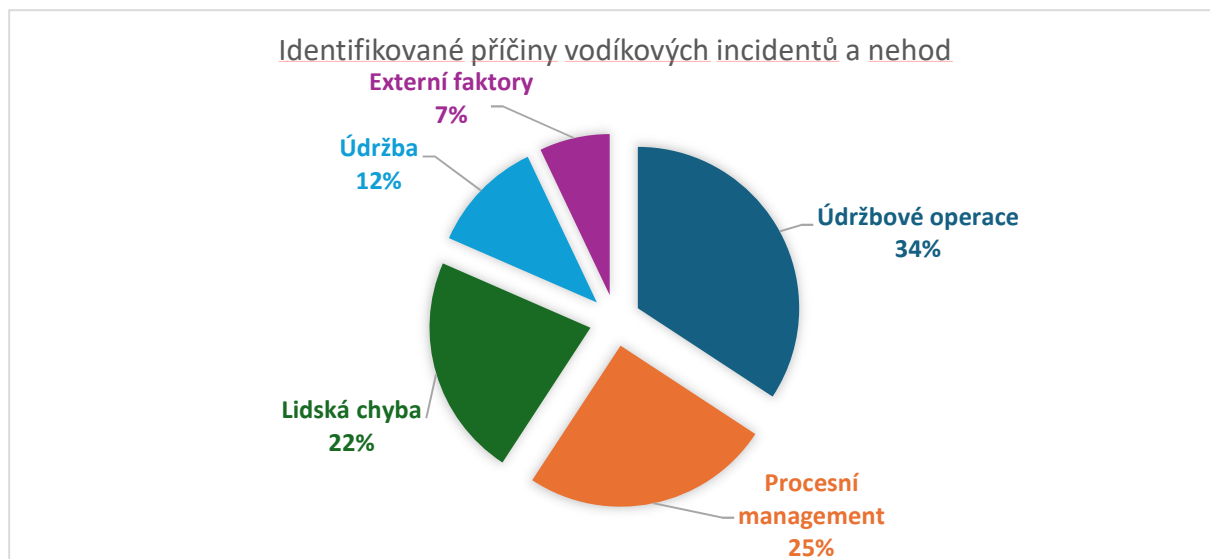
Databáze incidentů a nehod souvisejících s vodíkem (dále jen „HIAD“) rozeznává celkem 18 typových událostí souvisejících s výrobou vodíku. Rozdělením na typ mimořádné události se jedná o 13 explozí, 2 požáry, 2 úniky do ovzduší bez následného požáru a 1 skoronehodu. Aktuální data budou dostupná v HIAD [26].



Obrázek 8: Příčiny nehod související s údržbou. [26]

Příčiny mimořádných událostí

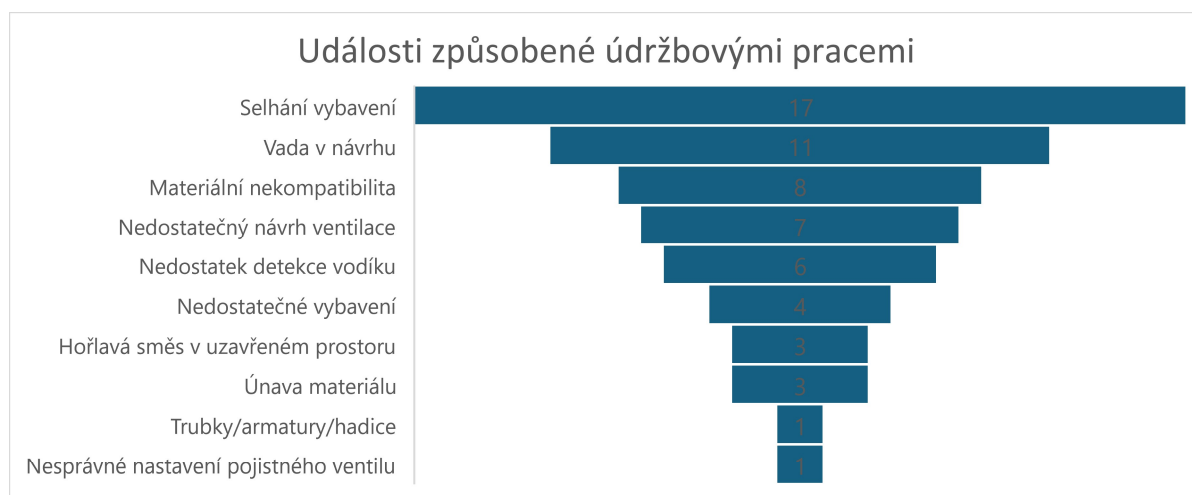
Z databází lze vyčíst hlavní příčiny nehod a skoronehod. Identifikace příčin ukazuje, že většina incidentů byla způsobena údržbovou rutinou, viz Obrázek 8 [9]. Hlavními příčinami lidských chyb bylo nedodržení pokynů, nedostatečné školení nebo nedostatek povědomí o rizicích. Lze dospět k závěru, že organizační a lidské faktory byly za 87 % analyzovaných událostí souvisejících s vodíkem. Nicméně, v sedmi zkoumaných událostech se vyskytly také problémy s instalací a údržbou. Jedna událost může mít mnoho podkladových příčin, což vysvětluje více než 100 % detekovaných příčin.



Obrázek 9: Příčiny nehod související s údržbou. [68Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.]

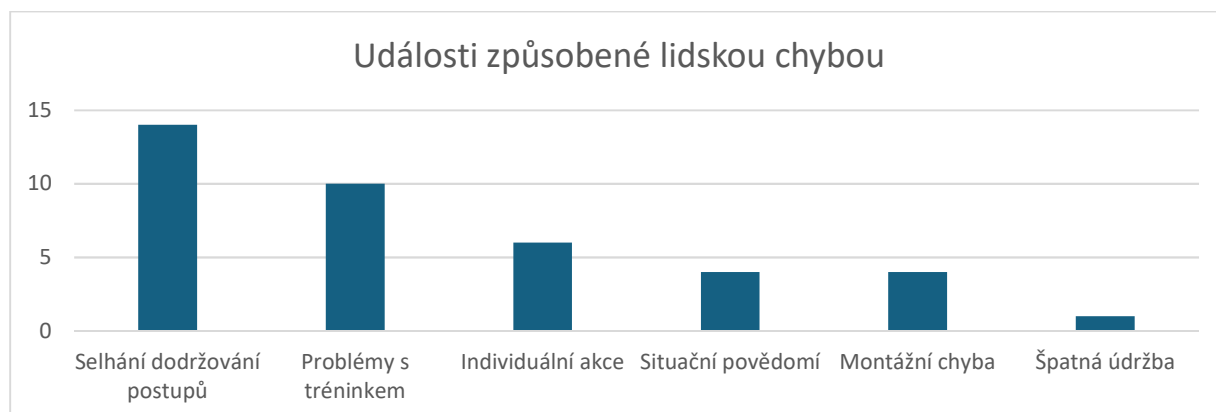
Přibližně polovina incidentů s vodíkem byla způsobena organizačními a manažerskými problémy, což je uvedeno na Obrázku 9. Ve studii Wen a kol. [7] byly zjištěny podobné závěry, ale s některými rozdíly, například 11 % incidentů bylo způsobeno chybami při instalaci, zatímco v této studii to bylo 21 %. Materiální a výrobní chyby tvořily 35 % a lidské faktory 29 % [7], což je méně než ve studii. Studie Spada a kol. [8] ukázala, že většinu nehod způsobily lidské aktivity (52 %) a technologický pokrok (41 %). Rozdíly v procentech mezi studiemi mohou být způsobeny odlišným zaměřením a parametry studií. „Návrhová chyba“, „technická“ a „chyba operátora“ se jeví jako nejčastější primární příčiny, zatímco „řízení“ a „údržba“ jsou stejně časté jako primární i sekundární příčiny. Externí faktory, včetně povětrnostních jevů a automobilových nehod, představovaly 13 % hlavních příčin.

Údržbové práce, nesprávné řízení procesů a lidská chyba jsou hlavními identifikovanými příčinami mimořádných událostí související s nakládáním s vodíkem. Obrázek 10 ukazuje distribuci jednotlivých atributů údržbových prací. Nejčastějším problémem je selhání vybavení při údržbě.



Obrázek 10: Obecné příčiny [68]

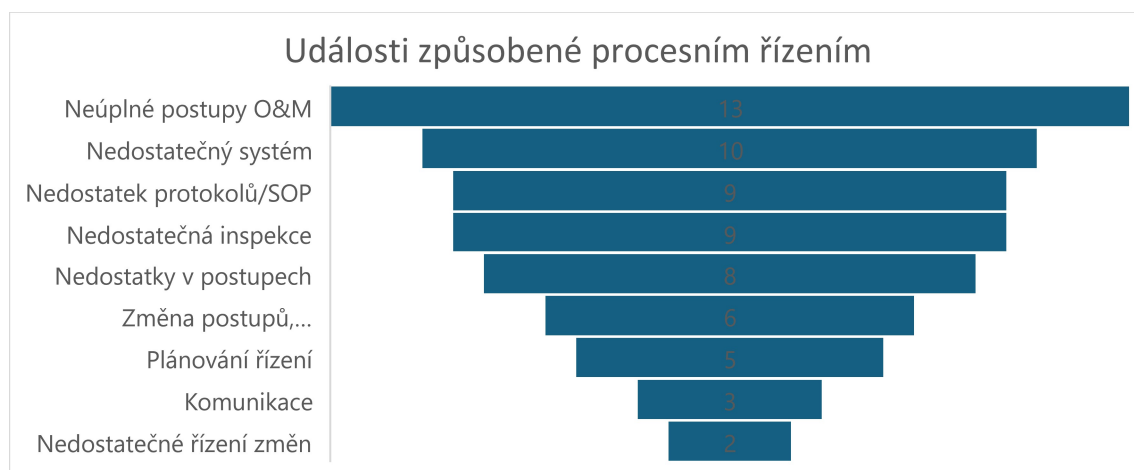
Události způsobené lidskou chybou při výrobě vodíku se často týkají nesprávné obsluhy zařízení ve smyslu nedodržování daných postupů, problémy vycházející z nedostatečného školení, samotné nedostatečné údržby nebo chybných rozhodnutí během provozu. Graf poukazuje na důležitost důkladného školení personálu, zavedení jasných procesů řízení rizik a pravidelného monitoring kritických míst.



Obrázek 11: Události způsobené lidským přičiněním [68]

Události způsobené procesním řízením při výrobě vodíku se obvykle vážou na selhání v plánování, monitorování nebo kontrole provozních procesů. Neúplné postupy pro provoz a údržbu jsou nejčastější příčinou (13 případů). Jde o nedostatečnou dokumentaci nebo implementaci postupů údržby a provozu, což může vést k chybám nebo poruchám. Druhá nejčastější příčina (10 případů) zahrnuje selhání systémů řízení nebo monitorování. Absence standardních operačních postupů (9 případů) může způsobit nekonzistentní a chybné procesy. Selhání při pravidelné kontrole a monitorování zařízení jsou další častou příčinou (9 případů). Následují chyby nebo mezery v zavedených procesech (8 případů). Nepředvídatelné důsledky změn způsobené nedostatečnou koordinací tvoří cca polovinu všech případů (6 případů). Na

posledních místech pak je plánování, řízení a komunikace. Nedostatečné plánování nebo sdílení informací vede ke špatnému provedení (5 a 3 případy). Početně menší, ale stále významné příčiny jsou nedostatečná komunikace a chybějící strukturu pro zavádění změn.



Obrázek 12: Události způsobené procesním řízením. [68]

Případy incidentů v následující tabulce ukazují, že hlavními příčinami nehod při výrobě a skladování vodíku jsou technická selhání (např. praskliny v potrubí, poruchy ventilů a těsnění), nedostatečná údržba a kontrola zařízení, a chyby v návrhu systémů. Odezvou na tyto události většinou bývá implementace přísných bezpečnostních opatření a pravidelných kontrol pro minimalizaci rizika těchto nehod.

Tabulka 5: Případové studie

Nehoda	Rok	Popis	Ponaučení	Zdroj
Kjørbo incident – únik vodíku s následnou iniciací - jet fire	2019	Lidská chyba při sestavě těsnění ve vysokotlaké nádobě – vedlo k úniku	Materiál byl v pořádku, návrh také, ale příčina nehody byla ve skutečném provedení.	Nelhydrogen
Výbuch v závodě na výrobu vodíku v Jižní Koreji	2019	Výbuch v závodě na výrobu vodíku vedl k úmrtí šesti osob a zranění jedné další.	Je nutné porozumět mechanismům a rizikovým scénářům, dále dodržovat striktní opatření nastavená pro manipulaci s vodíkem.	Aria
Výbuch a požár ve vodíkové plnicí stanici v	2019	Došlo k náhlému a nekontrolovanému úniku a nahromadění	Tento incident vyzdvihuje potřebu konstantního přeškolení personálu, implementaci standardizovaných postupů	H2tools

Santa Claře, Kalifornie		vodíku, po kterém následoval výbuch a požár.	pro manipulaci s vodíkem a důležitost pochopení rizikových scénářů.	
Výbuch vodíku v uhelné elektrárně	2007	Ohýbání potrubí zapříčiněné nevhodným umístěním techniky v jeho okolí způsobilo dlouhodobý únik vodíků. Tento oblak byl zapálen blízkými svářečskými pracemi.	Potřeba nastavení kritérií pro hodnocení výběru, použití a monitoringu potrubí. Je třeba ustavit a klarifikovat pracovní role pro kontrolu a inspekci těchto struktur.	Aria
Požár v laboratoři	2017	Požár vznikl v důsledku úniku vodíku během testování palivových článků.	Důraz na správné postupy při manipulaci s vodíkem a pravidelné kontroly těsnosti zařízení.	H2tools
Únik vodíku z kompresoru na plnicí stanici	2017	Únik vodíku z kompresoru vedl k potenciálně nebezpečné situaci.	Pravidelná údržba a kontrola kompresorů na vodíkových stanicích.	H2tools
Výbuch vodíku v chemickém závodě	2011	Výbuch nastal během výrobního procesu zahrnujícího vodík, což způsobilo zranění a škody na zařízení.	Zlepšené monitorovací a kontrolní systémy k detekci časných příznaků potenciálních výbuchů.	H2tools
Výbuch vodíku v elektrárně Muskingum River vlivem přetlaku na konstrukce a zařízení	2007	Výbuch v uhelné elektrárně způsobil jedno úmrtí, zranění 10 dalších osob a významné škody.	Zavedení přísnějších bezpečnostních protokolů a pravidelných údržbářských kontrol v elektrárnách.	PowerMag
Výbuch a požár v závodě na výrobu vodíku vlivem úniku	2001	Asistent operátora provedl rutinní inspekci. Přibližně o hodinu později došlo k velkému	Provést generální opravu a vyměnit membrány u článků s nízkou čistotou. Nahradit stávající analyzátor čistoty LP modelem s bezpečným	H2 tools

vodíku mimo výrobní články, ty byly blokovány v přívodním vodovodním potrubí		výbuchu, po kterém následoval požár.	provozem. Instalovat analyzátory čistoty HP za kompresory. Zlepšit odvodňovací potrubí. Zvýšit délku potrubí nad vodní hladinu. Zlepšit větrání budovy. Prozkoumat instalaci tlakových spínačů pro kompresory.	
Výbuch ve vodíkové továrně Praxair vlivem poruchy elektrolyzéru	2008	Výbuch ve vodíkové továrně Praxair v St. Louis, Missouri, způsobený poruchou elektrolyzéru. Únik vodíku vedl k požáru a výbuchu.	Nutnost přísné údržby a monitorování elektrolyzerových systémů.	Praxair internal safety reports
Požár ve vodíkovém zařízení Air Liquide vlivem selhání těsnění nebo ventilu	2001	Požár ve vodíkovém zařízení Air Liquide v Delaware, USA, způsobený únikem z vodíkové nádrže, který se vznítil.	Důležitost správných skladovacích protokolů a účinných systémů potlačování požáru.	Delaware News Journal, Air Liquide internal reports
Výbuch vodíku v Nisseki Chemical vlivem selhání těsnění nebo ventilu	1999	Výbuch ve vodíkové továrně způsobený únikem vodíku, který se vznítil.	Nutnost důkladných bezpečnostních protokolů a systémů detekce úniků.	Nisseki Chemical incident report
Praskliny ve svarech potrubí na vodík	2016	Elektrostatický náboj způsobil praskliny ve svarech, což vedlo k únikům vodíku.	Pravidelná inspekce a údržba k prevenci hromadění elektrostatického náboje. Vývoj lepších svařovacích technik a materiálů.	ScienceDirect
Selhání automatického vodíkového kulového ventilu		Selhání v důsledku zlomení části ventilu, což vedlo k poruše zařízení.	Zajištění, že všechna zařízení jsou určena pro prostředí s vodíkem a podléhají pravidelnému testování. Vývoj lepších	H2Tools

		svařovacích technik a materiálů.	
Velká vibrace generátoru způsobila poškození těsnění	Elektrická závada způsobila velkou vibraci, která poškodila těsnění.	Rychlé řešení elektrických závad a zajištění správných těsnících materiálů. Lepší design a materiály pro těsnění v systémech s vodíkem.	NREL
Výbuch vodíku v chemickém závodě	Výbuch nastal během výrobního procesu zahrnujícího vodík, což způsobilo zranění a škody na zařízení.	Zlepšené monitorovací a kontrolní systémy k detekci časných příznaků potenciálních výbuchů. Přísnější předpisy a zlepšené bezpečnostní protokoly pro použití vodíku v chemických závodech.	ARIA

Nehody zmíněné v tabulce souvisí s výrobou, ale také skladováním nebo používáním vodíku. Níže jsou uvedeny vybrané metody události související přímo s výrobou, které jsou podstatné z hlediska předcházení podobným událostem, tedy účinné technické i organizační prevenci.

Exploze ve výrobě vodíku (Muskingum, Ohio USA, 2007)

Dne 8. ledna 2007 ráno pracovníci vjeli na místo u elektrárny s velkým přívěsem s dlouhými podélnými tlakovými lahvemi. V přívěsu bylo deset lahví naplněných vodíkem o tlaku 17,2 MPa, který měl být přečerpán do dvou skladovacích nádob na místě. Tyto nádrže mohly pojmout až 400 m³ vodíku skladovaného při tlaku 13,8 MPa, což odpovídá přibližně 35 kg vodíku. Tlakový dopravní systém byl nevhodně navržen a nedokázal zvládnout tlak a průtok spojený s únikem vodíku. Měděné potrubí použité v systému nebylo dimenzováno na vysoký tlak ani mechanické namáhání způsobené průtokem vodíku. Koroze, způsobená pravděpodobně pronikáním vody do systému, dále snížila integritu potrubí. Navíc přístřešek, pod kterým se skladovací nádrže nacházely, nebyl navržen s ohledem na bezpečnostní požadavky pro práci s vodíkem. Konstrukce přístřešku umožnila hromadění vodíku ve stísněném prostoru, což bylo v rozporu s normami NFPA 2, které vyžadují zajištění volného úniku vodíku do atmosféry. Exploze byla iniciována neznámým zdrojem, což je u vodíkových nehod běžné vzhledem k velmi nízké energii potřebné k zapálení směsi. Mezi možné zdroje patřil elektrostatický výboj, elektrické panely nebo osvětlení pod přístřeškem. Výsledkem byla ničivá exploze, která si vyžádala život řidiče nákladního vozu, zranila deset zaměstnanců a způsobila značné materiální škody. Detailní analýza odhalila klíčové nedostatky, včetně nesprávně dimenzované pojistné membrány, chybného návrhu ventilačního systému, použití nevhodných materiálů a zanedbané údržby. Rovněž bylo zjištěno, že podobný incident se stal v sesterském závodě dva roky před touto nehodou, ale zjištěná doporučení nebyla implementována [27].



Obrázek13: Červeně označená ochranné je místo původního ochranného přístřešku, který nebyl projektován podle pravidel pro bezpečné odvětrávání, což umožnilo hromadění výbušného plynu. [27]

Stejně jako u mnoha jiných katastrofických událostí bylo identifikováno více událostí, které se odehrály v řadě za sebou a vedly k výbuchu:

- Tato událost začala předčasným roztržením ochranného tlakového prstence na potrubí skladovací nádrže (vydrželo mnohem nižší tlak, než mělo). Toto selhání samo o sobě nemělo vést k výbuchu. Vodík měl uniknout správně navrženým odvězdušňovacím systémem a neškodně se rozptýlit do prostředí nad přístřeškem. Namísto toho tlakový plyn způsobil selhání odvězdušňovacího systému a způsobil únik vodíku.
- Plyný vodík se následně hromadil pod nesprávně navrženým horním přístřeškem, kde se posléze vznítil. V přístřešku bylo identifikováno více potenciálních zdrojů vznícení – není zřejmé, který to skutečně byl.

Tato tragická nehoda poukazuje na několik klíčových poznatků pro praxi:

- Správná údržba a servis mohly zlepšit/ohlídat reálný stav ochranného trhacího prstence a odvězdušňovacího potrubí.

- Potřeba návrhu a instalace odvzdušňovacích systémů tak, aby odolaly tlakovým silám spojeným s únikem – vhodné materiály a konstrukce mohly zabránit selhání odvzdušňovacího potrubí.
- Navrhnout odvzdušňovací potrubí tak, aby bylo zabráněno vniknutí vody – osvědčené konstrukční postupy mohly zabránit korozi a oslabení odvzdušňovacího potrubí.
- Konstrukce odvzdušňovacích cest navrhnout tak, aby zabraňovala hromadění vodíku, který je lehčí než vzduch.
- Zajistit, aby byl personál řádně školen a seznámen s riziky specifickými pro vodík – od počátečního návrhu systému až po instalaci, průběžné používání a údržbu pomáhá školení o bezpečnosti vodíku bránit se proti požárům a výbuchům vodíku, chránit životy, majetek a provoz podniku.

Výbuch čerpací stanice Nel ASA (Norsko, 2019)

Průběh nehody:

- Drobný únik po dobu několika hodin (odhadem 0,04 g/s) z nádrže o tlaku 950 barů,
- Následně náhlé selhání těsnění => 1,5-3,0 kg uniklo za 3 sekundy,
- Následoval silný výbuch, který byl zřejmě následovaný druhým výbuchem uvnitř kompresorového modulu.

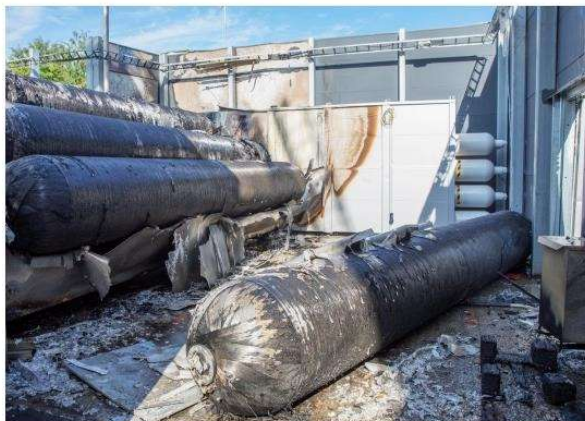
Analýza základních příčin v tomto případě odhalila, že:³

- Počáteční stav:
 - Zelené šrouby byly správně utaženy,
 - Modré šrouby nebyly správně/dostatečně utaženy.
- Fáze selhání červeného těsnění:
 - Začíná malým únikem v oblasti červeného těsnění,
 - Malý únik postupně opotřebovává červené těsnění a situace se zhoršuje,
 - Velký únik přesahuje kapacitu odvzdušňovacího otvoru, což způsobuje nárůst tlaku uvnitř oblasti modrého těsnění.
- Fáze zvednutí pouzdra se zátkou a selhání modrého těsnění:
 - Nedostatečné předpětí šroubů vede k uvolnění a zvednutí zátky, což okamžitě způsobí selhání modrých těsnění,
 - Vodík uniká nekontrolovaně a nekontrolovaným způsobem se šíří.

³ <https://mb.cision.com/Public/115/2852735/8189422a0b076d6c.pdf>



Houses at > 225 m distance



Obrázek14: Výbuch 3-3,5 kg vodíku v roce 2019 v Norsku. Případ je zajímavý z hlediska odstupových vzdáleností. Kancelářská budova byla ve vzdálenosti 60 m, obytné domy od 225 m. [28]



Obrázek 15: Výbuch 3-3,5 kg vodíku v roce 2019 v Norsku, na snímku je zřetelné poškození konstrukcí a rozlet kusů konstrukcí.

Tabulka 6 obsahuje výňatek nehod z databáze HIAD, souvisejících s výrobou vodíku. Informace v ní obsažené se vztahují k problematice vzniku, ale i rozvoje mimořádné události, v případě relevantnosti jsou uvedeny např. i časové osy.

Tabulka 6 Souhrn nehod z databáze HIAD, souvisejících s výrobou vodíku (upraveno v souladu s HIAD4)

UDÁLOST (APLIKACE)	POPIS UDÁLOSTI
VÝBUCH V JEDNOTCE NA VÝROBU VODÍKU (PARNÍ REFORMING METANU)	K výbuchu došlo v jednotce na výrobu vodíku v rafinerii. Roztok uhličitany draselného byl odčerpáván z absorpční věže do dočasné skladovací nádrže kvůli údržbě při odstávce. Nádrž explodovala v důsledku zpětného toku vodíku do nádrže. Hladina roztoku ve věži nebyla kontrolována. Při odčerpávání vodního roztoku v absorpční věži pro plynnou kyselinu uhličitou klesá hladina vody v roztoku. Tento pokles byl ignorován a čerpadlo kavitovalo. Protože čerpadlo a přečerpávací ventil nebyly okamžitě uzavřeny, vodík v absorpční věži proudil do nádrže. Vodík se v nádrži vznítil, pravděpodobně v důsledku jiskry na povrchu stěny nebo na povrchu roztoku. Síla proudění strhla šupiny, hrubé částice a roztok v nádrži. Časová osa Dne 23. května 1996: provoz byl zastaven. Dne 24. září v 7:05; změna směny. 7:30; konala se porada o údržbě při odstávce obratu. Kolem 8:00; porada skončila a operátoři odpovědní za odčerpávání roztoku dvacet minut četli a srovnávali provozní příručku. Asi v 8:10; začal se odčerpávat vodný roztok uhličitany draselného do inventární nádrže. Protože se objevila kavitace čerpadla, byl seřizen výtlačný ventil, ale čerpadlo nadále kavitovalo, takže čerpadlo bylo zastaveno a čerpací práce byly rovněž pozastaveny. Kolem 8:15; nádrž explodovala. Její střecha byla k nalezení na pozemcích sousedních kanceláří a kancelářské budovy a vozidla byly výbuchem poškozeny.
VÝBUCH ELEKTROLYZÉRU (ELEKTROLÝZA VODY)	V zařízení na elektrolýzu dojde k výbuchu v zásobníku kyslíku. Výbuch je způsoben vniknutím vodíku do držáku kyslíku. Došlo k roztržení kopule držáku plynu a límce.

⁴ European Hydrogen Incidents and Accidents database HIAD 2.1, European Commission, Joint Research Centre
<https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt>

POŽÁR POTRUBÍ S KAPALNÝM VODÍKEM (VÝROBA KAPALNÉHO VODÍKU)	V závodě došlo k požáru. Požár vznikl v důsledku úniku kapalného vodíku ze spoje mezi uzavíracím blokovým ventilem a pojistným ventilem na jednom z předeříváčů separační kolony. Přepouštěcí ventil byl v opravě a v době události byl znovu uváděn do provozu. Byl jmenován vyšetřovací tým. Prvním úkolem bylo potvrdit, že je bezpečné obnovit provoz v dané části zařízení.
VÝBUCH ZÁSOBNÍKU VODÍKU	Ve skladovací nádrži (300 kg vodíku) došlo k prasklině, při které se do atmosféry uvolnil plynný vodík. Oblak par explodoval se zdánlivým centrem výbuchu ve výšce 9 m nad zemí, s energií odpovídající 9 až 18 kg TNT.
VÝBUCH A POŽÁR V BUDOVĚ PRO STLAČOVÁNÍ VODÍKU (STLAČOVÁNÍ VODÍKU)	Požár zapálil střešní krytinu, která spadla v důsledku výbuchu. Obsluha, která byla v době výbuchu mimo závod, stiskla nouzový vypínač, který vypnul všechny kompresory. Ačkoli byl v omráčeném stavu, zkontroloval poté v motorové místnosti, zda se všechny motory zastavily. Požární poplach vyhlásil vrátný, který slyšel výbuch a viděl plameny a kouř v blízkosti vodíkové stanice. Hasičský tým závodu byl rychle na místě, ale bylo mu doporučeno, aby požár nehasil, dokud vodík stále uniká, aby se zabránilo pravděpodobnosti dalšího výbuchu. Přívod vodíku do kompresorovny byl přerušen a zařízení bylo elektricky odpojeno a uhašeno pomocí vody.
VÝBUCH VE FARMACEUTICKÉM ZÁVODĚ (ELEKTROLÝZA VODY)	Vybuchl zásobník na vodík. Předpokládá se, že došlo k netěsnosti membrány ve vodíkovo-kyslíkovém elektrolytickém článku používaném k výrobě vysoce čistého vodíku pro farmaceutickou hydrogenaci.
VÝBUCH V ZÁVODĚ NA VÝROBU VODÍKU (ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU KAPALNÉHO A STLAČENÉHO VODÍKU)	Vodíková elektrárna explodovala, trosky se rozletěly do vzdálenosti desítek metrů a vážně ji poškodily. Dva pracovníci, kteří se v té době v zařízení nacházeli, nebyli vážně zraněni. Závod měl údajně kapacitu 3 600 tun kapalného vodíku ročně. Bylo oznámeno, že sekce kapalného vodíku byla zřejmě zničena. Podle ředitele závodu: "K výbuchu došlo v tělese závodu, tam, kde stlačujeme a chladíme plynný vodík. Zatím se zdá, že byla zničena velká část zařízení na výrobu kapalného vodíku. Na druhé straně ulice však zůstávají všechna naše zařízení na výrobu plynného vodíku. Toto oddělení je stále v provozu." Tisková zpráva společnosti Hydrogen AL potvrdila, že došlo k výbuchu zařízení na zkapalňování vodíku.

VÝBUCH VE SKLADU VODÍKU V JEDNOTCE NA VÝROBU ČPAVKU (STACIONÁRNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU)	K výbuchu došlo ve vodíkovém plynoměru. Zvon v plynoměru byl zvednut do výšky 15-20 m a praskl. Kryt spadl na potrubní most vedle plynoměru. Válcová část zvonu spadla do nádrže plynoměru. Příčinou výbuchu byla doprava kyslíku do vodíkového plynoměru. To bylo způsobeno špatným odvodněním a odpovídajícím přetlakem v přívodním potrubí kyslíku. Žádné osoby nebyly zraněny. Vodíkový plynoměr byl zničen a došlo také ke značnému poškození plynoměrů 02 a N2. Několik potrubí bylo strženo a byly poškozeny základy potrubního mostu. Došlo také k poškození sousedních budov a mnoho oken bylo zcela rozbito. Celkem bylo poškozeno 1 200 m³ skla. K možným zdrojům vznícení nejsou žádné informace. Studie HAZOP, která byla provedena po výbuchu, ukázala, že by bylo možné provést řadu zlepšení ke zvýšení bezpečnosti.
VÝBUCH V ELEKTROLÝZNÍ JEDNOTCE CHEMICKÉ TOVÁRNY (STACIONÁRNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU)	K výbuchu došlo v elektrolýzní jednotce chemické továrny Lurgi. Závod utrpěl rozsáhlé škody a jeden člověk zemřel. Elektrolýzní zařízení vyrábělo elektrolýzou roztoku hydroxidu draselného vodík pro technologické účely a kyslík jako odpadní produkt. Vyšetřování dospělo k závěru, že k výbuchu pravděpodobně došlo na odlučovači kyslíku, do kterého unikl vodík. Po nehodě společnost provedla hmotnostní bilanci toků vodíku těsně před výbuchem a zjistila, že ne méně než 50 % z nich bylo nezapočítáno. Vniknutí vodíku do kyslíkového bubnu bylo zřejmě způsobeno korozí/erozí v elektrolýzních člancích. Vnitřní rozpad článků byl pravděpodobně zahájen již nějakou dobu před nehodou. Před nehodou bylo v bloku článků slyšet praskání, které mohlo naznačovat menší exploze. Existoval systém monitorování čistoty proudů vodíku a kyslíku pomocí hodinových analýz plynů prováděných provozovatelem procesu. Z důkazů vyplynulo, že tyto analýzy nebyly vždy prováděny a že do technologického deníku byly zapisovány jen předpokládané hodnoty. Jeden z obsluhujících uvedl, že analýzy prováděl pouze dvakrát nebo třikrát za 12 h. Zpráva o nehodě vypracovaná HSE odhaduje, že na základě poškození způsobeného výbuchem obsahoval buben s kyslíkem o objemu 1690 l směs 13,5 % vodíku a 86,5 % kyslíku a výbuch vyvolal rázovou vlnu odpovídající 22 kg TNT. Bylo vypočteno, že tento výbuch by na otevřeném místě způsobil přetlak 1,03 kPa ve výšce 220 m a 0,21 kPa ve výšce 660 m. Továrna se nacházela v městské zástavbě, domy byly vzdáleny 180 m a škola 210 m od elektrolýzy. Ačkoli by se na

VÝBUCH V JEDNOTCE NA VÝROBU VODÍKU (PARNÍ REFORMING METANU)	otevřeném prostranství daly očekávat určité škody způsobené výbuchem popsané velikosti v těchto vzdálenostech, ve skutečnosti k žádným nedošlo. Pravděpodobně to bylo způsobeno tím, že elektrolýza byla umístěna v budově navržené a postavené tak, aby případný výbuch směřoval vzhůru. Výbuch a požár v zařízení na výrobu vodíku pro hydrokrakovací zařízení a hydroteplárnu využívající naftu v nedaleké rafinérii. Nebylo hlášeno žádné zranění zaměstnanců. Podle majitele závodu došlo k události ve sběrném potrubí, označovaném také jako sběrná hlavice nebo přečerpávací potrubí. Událost se stala v důsledku poruchy vnějšího potrubí z uhlíkové oceli v části sběrného potrubí.
POŽÁR A VÝBUCH V ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU A SKLADOVÁNÍ VODÍKU (VÝROBA VODÍKU ELEKTROLÝZOU)	K výbuchu došlo v továrně na vodíkové palivo, která slouží především pro vozový park vodíkových vysokozdvížných vozíků. Výbuch poškodil několik blízkých domů a byl cítit téměř 10 kilometrů daleko. U několika domů v okolí došlo k rozbití skla. Podle prohlášení společnosti "...nedošlo k výbuchu žádné ze skladovacích nádrží na místě a žádný pracovník nebyl zraněn".
VÝBUCH VODÍKU V ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU OBNOVITELNÉHO VODÍKU (ELEKTROLÝZA VODY)	Vodíkové vyrovnávací nádrže, které explodovaly, byly součástí experimentálního zařízení, v němž se zkoušela výroba obnovitelného vodíku z vodního elektrolyzéru spojeného se solárními panely. Tři vodíkové nádrže (každá o objemu 40 m³ a tlaku 1,2 MPa v jedné z nich a 0,7 MPa ve dvou dalších) jímaly vodík vyrobený elektrolyzérem. Všechny tři nádrže byly při výbuchu zničeny; nedošlo k žádnému požáru, ale exploze byla dostatečně silná na to, aby se trosky rozletěly na ploše přes 3 000 metrů čtverečních. Není známo, zda explodovaly tři nádrže najednou, nebo zda šlo o sérii výbuchů. Výbuch zabil dva lidi, šest dalších zranil a způsobil škody v nedalekém závodě na výrobu keramických komponentů. Budovy v okruhu 100 m od nádrží byly silně poškozeny. Výbuch slyšeli i lidé ve městě vzdáleném 6-7 km od místa výbuchu.

VÝBUCH VODNÍHO ELEKTROLYZÉRU (ELEKTROLÝZA VODY)	K nehodě došlo během ověřovacího provozu nového vysokotlakého generátoru vodíku. Elektrolýzní článek shořel, potrubí kyslíkového okruhu prasklo a periferní zařízení bylo rozmetáno po celé ploše, kde bylo zařízení nainstalováno. Skleněné střeby byly rozptýleny v okruhu deseti metrů. Nedošlo k žádnému zranění. Analýza události stanovila jako pravděpodobnou iniciační příčinu vystavení titanové elektrody kyslíku v elektrolýzním článku a její následné shoření. Další možnou spolupříčinou je, že se vznítil vzniklý vodík. V důsledku toho se proud vody nesoucí vodík smísil s vodou nesoucí kyslík a skončil v nádrži na separaci kyslíku, čímž vznikla výbušná směs a došlo k výbuchu, který porušil potrubí. Napětí na generátoru bylo vypnuto v rané fázi incidentu. Později bylo vypnuto také čerpadlo recirkulace vody. Tlak uvnitř komory se nicméně i přes aktivaci bezpečnostního ventilu stále zvyšoval z nominální hodnoty 40 MPa na hodnotu odhadovanou kolem 100 MPa.
ÚNIK HYDROXIDU DRASELNÉHO Z VODNÍHO ELEKTROLYZÉRU (ELEKTROLÝZA VODY)	Incident spočíval v úniku roztoku hydroxidu draselného (KOH) z alkalického elektrolýzoru v zařízení na výrobu obnovitelného vodíku. Jedna ze zpráv na webových stránkách uvedla, že tvorba kouře spustila požární poplachový systém. Podle výrobce se zařízení vypnulo a automaticky přešlo do bezpečnostního režimu v souladu s integrovaným bezpečnostním systémem. Při události nebyl nikdo zraněn a nedošlo k žádným škodám na životním prostředí.
POŽÁR ALKALICKÉHO ELEKTROLYZÉRU (ELEKTROLÝZA VODY)	V jednotce v chemickém závodu vypukl požár izolačních plastových prvků alkalického elektrolýzoru. Směna viděla kouř z velínu. Prvním opatřením bylo vypuštění potaše do nádrže k tomu určené a odstavení elektrolýzoru. Byla přerušena dodávka elektřiny. Bezpečnostní technik dostal požár pod kontrolu za méně než 10 minut pomocí hasicích přístrojů CO₂. Přibližně po šesti hodinách byla jednotka znovu spuštěna.

VÝBUCH
ELEKTROLYZÉRU
NA ČERPACÍ
STANICI
(ELEKTROLÝZA
VODY)

K této události došlo na elektrolyzéru čerpací stanice. Na místě se nacházel zaměstnanec výrobce elektrolyzérů, který provedl reset systému jističů elektrárny a obnovil výrobu plynu. Při uvádění systému do provozu se ozvala hlasitá "rána". Při prohlídce důkazů z kamerového systému stanice byl spatřen oblak vodní páry, který byl vypuštěn z odvětrávacího potrubí kyslíkové nádoby elektrolyzéro. Systém generování plynu byl bezpečně odstaven a bylo zahájeno vyšetřování s cílem pochopit příčinu a možné dopady. Šetření na místě neodhalilo žádné viditelné poškození zařízení elektrolyzéro, včetně systému čištění vody a výfukového potrubí kyslíku. Naopak bylo zjištěno poškození komína: na komíně se zpočátku objevila prasklina v první fólii na spodní koncové desce (příčina neznámá). Je pravděpodobné, že to způsobovalo netěsnost a zvýšení tlakové ztráty. Velmi pravděpodobně však tento pokles nebyl dostatečně velký na to, aby byl zjištěn při zkoušce poklesu tlaku. Komín mohl stále generovat tlak, protože rychlost generace by byla větší než rychlost úniku. Z analýzy údajů vyplynulo, že nastavené hodnoty určené k detekci tohoto typu poruchového režimu byly upraveny oproti původně nastaveným hodnotám. Proto zařízení automaticky nezaznamenalo alarm ve vhodnou dobu, aby zastavilo všechny operace. Důležitou součástí studie bylo zjistit, zda byl oblak vodní párou nebo kouřem. Jelikož nebyly nalezeny žádné stopy plamene ani tepelné poškození potrubí, lze konstatovat, že oblak byl vodní párou a nikoliv důsledkem požáru. "Vodní pára se uvolnila v důsledku spojení malého množství plynného vodíku a kyslíku v komínovém systému."

VYPOUŠTĚNÍ ZE SKLADU ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU VODÍKU (ELEKTROLÝZA VODY)	K náhodnému úniku vodíku došlo při testování skladovacího systému připojeného k elektrolyzátoru PEM. Zkouška těsnosti spočívala v plnění zásobníku vodíkem při postupném zvyšování tlaku. Při tlaku 3 bar (0,3 MPa), který neodhalil žádný únik, byl zásobník natlakován na 5 bar (0,5 MPa). V tomto okamžiku se ze zásobníku na vnější straně budovy ozval syčivý zvuk, který naznačoval únik. Výroba vodíku byla zastavena a všechny uzavírací ventily byly automaticky uzavřeny. Protože k úniku došlo na "straně zásobníku u uzavíracích ventilů, únik pokračoval. Provozovatel se poté rozhodl nechat zásobník vypustit. Poté bylo místo úniku nalezeno a izolováno uzavřením blízkých ručních ventilů. Netěsnost se nacházela na přírubovém spoji v blízkosti zásobníku. Šrouby na této přírubě byly po události nalezeny uvolněné. Přesnou příčinu úniku se nepodařilo zjistit. Možným vysvětlením bylo, že se utažený spoj mohl uvolnit při instalaci odvětrávacího potrubí v důsledku manévrování s potrubím. Vibrace způsobené únikem mohly šrouby dále uvolnit. Těsnění bylo vyměněno, šrouby byly znovu dotaženy a utaženy a zásobník byl testován na těsnost až do 33 barů (3,3 MPa) bez dalších úniků. Za 60 minut se uvolnilo přibližně 224 Nm³ vodíku.
--	--

5.4. Závěry – poznatky a potřeby vyplývající z případových studií

Zmíněné databáze, včetně HIAD, shromažďují mnoho běžných událostí a jejich hlavním cílem je poskytnout rozsáhlou a veřejně dostupnou databázi nehod věnovanou aplikacím souvisejícím s vodíkem, aby bylo možné lépe porozumět rizikům spojeným s výrobou vodíku. Výroba vodíku, především reformingem metanu v páře, je rovněž náchylná k řadě nehod, které často souvisejí s vysokou teplotou a relativně vysokým tlakem v reformingovém reaktoru (tj. 800-900 °C a 30 barů).

Environmentální a vnější vlivy jsou sice zodpovědné za omezený počet událostí, ale mají nejvyšší smrtnost – deset zaznamenaných nehod způsobilo 15 úmrtí a 91 zranění. Bohužel je velmi obtížné těmto typům událostí předcházet. Zásadní poučení je, že nehody mohou být spuštěny několika příčinami, které by samostatně byly nevýznamné, ale jejich kombinace může vést k závažným následkům (Wen et al., 2022).

Na základě analýz, a i uvedených reálných incidentů, lze stanovit tyto důležité oblasti, kterým musí být věnována pozornost pro minimalizaci potenciálních rizik:

a) Legislativa, normy, systém:

- Zlepšit standardy pro tlakové vodíkové láhve a zvýšit požární ochranu pro vysokotlaké vodíkové láhve.
- Podpořit používání zařízení omezujících průtok a nasazení opatření pro chlazení vodním postřikem.
- Implementovat automatizovanou detekci úniků.
- Směřovat výpusti tlakových zařízení na bezpečná místa.
- Instalovat automatické hasicí systémy a vylepšené alarmové systémy.
- Zavést pokyny pro zlepšení požární ochrany plnicích stanic pro přívěsy/nádrže.
- Zlepšit fyzickou ochranu a stínění přepravovaných vodíkových komponentů.
- Přezkoumat předpisy pro přepravu a bezpečnostní protokoly pro manipulaci s vodíkem.
- Vypracovat plány nouzové připravenosti a provádět bezpečnostní přezkumy vodíkových instalací.

b) Údržba a inspekce:

- Zavést údržbářské postupy a školení pro systémy vodíkových čerpadel.
- Pravidelně měnit těsnění a O-kroužky na tělech regulátorů.
- Provádět pravidelné inspekce a údržbářské operace.
- Dokumentovat veškeré údržbářské práce a inspekce v systému údržby.

c) Prevence lidských chyb a školení

- Poskytovat školení a přeškolování personálu o manipulaci s vodíkem a postupech nouzové reakce.

- Provádět školení a cvičení pro nejhorší možné scénáře pro zaměstnance a první zasahující.
 - Vybavit kontrolní místnosti dodatečnými zvukovými systémy pro rychlejší reakci na alarmy.
 - Zavést monitorování hořlavých plynů a školení zaměstnanců, aby se předešlo nehodám.
 - Zajišťovat opakovaná školení pro laboratorní personál o nebezpečích souvisejících s vodíkem.
 - Aktualizovat bezpečnostní listy práce a školit personál o nových postupech.
- d) Komunikace a spolupráce
- Podporovat komunikaci zpráv o incidentech s vodíkem a dat relevantním zainteresovaným stranám.
 - Sdílet zprávy o incidentech a osvědčené postupy s ostatními entitami společnosti.
 - Provádět hodnocení rizik a zapojit všechny pracovníky do přezkoumání a diskuse o incidentech.
- e) Dodržování předpisů a standardizace
- Revidovat standardy tak, aby se zabývaly odolností proti požáru a nebezpečím výbuchu spojeným s vodíkovými instalacemi.
 - Poskytovat pokyny pro procesy a kontrolu nakládání s vodíkem v průmyslových aplikacích.
 - Zajistit shodu s evropskými standardy pro systémy skladování a dodávek vodíku.
- f) Připravenost na řešení mimořádných událostí
- Vypracovat nouzové postupy a plány reakce na potenciální úniky nebo incidenty s vodíkem.
 - Zajistit formální písemnou odpovědnost a komunikaci během nouzových situací.
 - Provádět hodnocení rizik na podporu revizí a úprav nouzových postupů.
- g) Optimalizace a zlepšení celého systému
- Optimalizovat postupy pro tlakové odlehčení potrubí, inspekci a výměnu ventilů.
 - Zlepšit postupy montáže, ověřování a dokumentace zařízení.
 - Vylepšit řídicí systémy přidáním dalších blokovacích a monitorovacích systémů.
 - Vypracovat denní/týdenní/měsíční kontrolní listy pro ověřování kritických prvků odvětvování a provozu systému.

6. Bezpečnostní opatření

6.1. Technická opatření

Technická opatření pro bezpečnost vodíkových technologií vycházejí jak z národních, tak zahraničních a evropských technických předpisů. V ČR se jedná zejména o české technické normy ČSN, které vydává Česká agentura pro standardizaci s.p.o., a dále technická pravidla (TPG, TDG, TIN), která vydává Český plynárenský svaz.

Výroba vodíku se z hlediska požární bezpečnosti staveb navrhuje dle ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty. Tato norma platí jak pro stavební objekty, tak i pro otevřená technologická zařízení. Otevřená technologická zařízení norma definuje jako zařízení sloužící výrobě, dopravě, popř. skladování, umístěné vně stavebního objektu (budovy), který nemá obvodové ani střešní konstrukce (např. volně stojící destilační kolony, nádrže, zásobníky, otevřené sklady tlakových láhví); otevřeným technologickým zařízeními jsou také dopravníkové, potrubní, popř. kabelové mosty, bez ohledu na to, zda mají ohraničující konstrukce. Norma stanoví obecný rámec požadavků z pohledu požární bezpečnosti.

Konkrétnější požadavky lze nalézt v ČSN P 73 0847 Požární bezpečnost staveb – Fotovoltaické (PV) systémy, která mimo jiné stanoví požadavky v případě přeměny elektrické energie z PV systémů na vodík a opačně.

Pro skladování vodíku (a dalších plynů) v tlakových nádobách stanoví požadavky norma ČSN 07 8304 Tlakové nádoby na plyny – Provozní pravidla.

Pro stavbu plnicích stanic stlačeného vodíku platí TPG 304 03 Plnicí stanice stlačeného vodíku pro mobilní zařízení. Toto technické pravidlo bohužel neřeší výrobu vodíku na místě (on-site). Požadavky pro výrobu vodíku elektrolýzou vody řeší ČSN P 73 0847, výrobu parním reformingem zemního plynu nebo pyrolýzou zemního plynu lze v obecné rovině řešit dle ČSN 73 0804. Bohužel zde chybí provázanost v případě, kdy tyto technologie jsou součástí technologického celku zejm. ve vazbě na bezpečnostní a odstupové vzdálenosti.

6.1.1. Požadavky na konstrukce

Stavební konstrukce musí:

- odolávat chemickým účinkům vodíku,
- vyhovovat statickým požadavkům,
- splňovat požadovanou požární odolnost,
- odolávat účinkům výbuchu.

V závislosti na zvoleném řešení, druhu objektu a technologie mohou být stanoveny další požadavky, resp. Mohou být výše uvedené požadavky redukovány.

6.1.2. Odstupové a bezpečnostní vzdálenosti

Dle souboru norem pro požární bezpečnost řady ČSN 73 08xx se od každého objektu nebo otevřeného technologického zařízení stanovuje požárně nebezpečný prostor. Požárně nebezpečný prostor je definován jako prostor vně hořícího objektu, ve kterém je nebezpečí přenesení požáru na jiný objekt nebo požární úsek sáláním tepla (hustota tepelného toku je vyšší než $18,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$) nebo padajícími hořícími částmi konstrukcí objektu.

Při umisťování výrobních technologií vodíku je nutné brát v úvahu požárně nebezpečný prostor stávajících objektů a otevřených technologických zařízení.

Dle předmětu normy ČSN 73 0804 se požárně nebezpečný prostor stanovený dle této normy se nevztahují na sklady plynů. To je dáno výpočtovým modelem, který je postaven na odhořívání pevných látek přepočtených na výhřevnost dřeva.

Pro sklady hořlavých, hoření podporujících a toxických plynů platí tyto bezpečnostní vzdálenosti stanovené dle ČSN 07 8304:

Tabulka 7 Uvedení nejmenších odstupových vzdáleností v souladu s ČSN 078304

Kapacita skladu nádob (přepočteno na nádoby o vodním objemu 50 litrů)	Nejmenší vzdálenost od
do 75 nádob (malý sklad) od 76 nádob (velký sklad)	skladů, provozních objektů a podzemních prostorů: nestanoveno 6 m
do 75 nádob (malý sklad) od 76 nádob (velký sklad)	obytných domů: 12 m 25 m
bez ohledu na kapacitu	veřejných budov a hromadných a stálých úkrytů civilní obraný: 30 m

Pro plnicí stanice stlačeného vodíku stanoví TPG 304 03 bezpečné vzdálenosti od technologie:

Tabulka 8 Bezpečné vzdálenosti od technologie s TPG 304 03

Nejmenší vzdálenost mezi	Požadavek [m]
šachtou kapalných pohonných hmot nebo LPG a vysokotlakými zásobníky H_2	8
vstupem do budovy obsluhy, prodejny, restaurace, toalet a výdejním stojanem H_2	5

vysokotlakými zásobníky a výdejním stojanem H ₂	8
výdejním stojanem kapalných pohonných hmot nebo LPG a výdejním stojanem H ₂	8
provozními objekty a jejich oplocení	1
ochranným svodidlem (obrubníkem) a vysokotlakými zásobníky H ₂	2
hranicí pozemku a vysokotlakými zásobníky H ₂ o objemu do 10 m ³ včetně	5
hranicí pozemku a výdejním stojanem H ₂	8
výška oplocení provozních objektů	2
výdejním stojanem H ₂ a výdejním stojanem CNG	2
šachtou pro plnění kapalných pohonných hmot a výdejním stojanem kapalných hmot nebo LPG	5
zdi budovy obsluhy, prodejny, restaurace, toalet a nízkotlakým zásobníkem zdrojového H ₂	8
kompresorem a nízkotlakým zásobníkem zdrojového H ₂	5
kompresorem a zdí budovy obsluhy, prodejny, restaurace, toalet	8

Nejmenší vzdálenosti zdrojových zásobníků stlačeného vodíku plnicích stanic od ostatních objektů a zařízení plnicí stanice stlačeného vodíku stanoví TPG 304 03, příloha 9:

Tabulka 9 Uvedení nejmenších odstupových vzdáleností v souladu s TPG 304 03

Nejmenší vzdálenosti	[m]
- Bezpečnostní vzdálenost ke zdrojům tepla a otevřeného ohně - Prostor s nebezpečím vzniku požáru a výbuchu od skladovacích a tlakových zařízení - Odstupová vzdálenost k technologii CNG a LNG	5

- Odstupová vzdálenosti ke stáčecímu stanovišti nebo úložišti pohonných hmot - Odstupová vzdálenost k ostatním technologickým zařízením čerpací stanice pohonných hmot - Odstupová vzdálenost k nádržím a skladům LPG - Odstupová vzdálenost ke stavbám s požárně otevřenými plochami a stavbám z hořlavých hmot a k sání vzduchotechnických zařízení - Bezpečnostní vzdálenost od komunikací s veřejným provozem a parkovišť	8
---	---

Další příklady lze nalézt v zahraniční. Navzdory mnoha pokusům určit kvantitativní vztahy mezi množstvím kapalného vodíku (LH₂) a vzdálenostmi skladovacích zařízení od obydlených budov jsou výsledky nejisté kvůli rozdílným předpokladům v jednotlivých institucích. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) vypracovala standardy pro různé země, které jsou srovnávány v tabulce.

Pro definici těchto vztahů se často používá zákon o závislosti vzdálenosti:

$$R = k * M^{(1/3)}$$

Kde:

- **R** je vzdálenost od hmoty **M** [kg].
- **k** je empirický faktor závislý na požadované úrovni ochrany a typu chráněného objektu. (např. pracovní budovy: 2,5–8; obytné budovy: 22, přičemž 200 znamená žádný dopad).

Hodnota faktoru **k** se liší v závislosti na konkrétních normách a předpisech. V České republice se touto problematikou zabývají normy ČSN^{5,6}.

⁵ ČSN EN 1127-1 ed. 3: Výbušné atmosféry – Prevence a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní pojmy a metodologie

⁶ ČSN EN 60079-10-1 ed. 2: Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry

Tabulka 10 Odstupové vzdálenosti od jednotlivých objektů ČSN^{7,8}.

	Vzdálenost od objektu:	Odst. vzd. [m]
1	Stěny s požární odolností 90 minut	2,50
2	Ostatní pevné skladovací nádrže LH2	1,5
3	Další cisterny/nádoby s LH2	3
4	Skladování kapalného kyslíku	6
5	Skladování hořlavých plynů	8
6	Technické a neobývané budovy	10
7	Hořlavé kapaliny	10
8	Hořlavé pevné látky	10
9	Otevřený plamen, kouření, svařování	10
10	Železnice, silnice, hranice pozemků	10
11	Nadzemní elektrické vedení	10
12	Obytné budovy	20
13	Vstupy do kompresorů vzduchu, klimatizace	20
14	Veřejné shromaždiště	20
15	Veřejné budovy	60

6.1.3. Zařízení detekce hořlavých plynů a par

Zařízení detekce hořlavých plynů a par je vyhrazeným požárně bezpečnostním zařízením, které na základě reakce čidel detekujících únik hořlavých plynů a par (vodíku) provádí návazné operace. Nejčastěji se jedná o:

- akustickou a optickou signalizaci úniku plynu,
- aktivaci havarijního větrání prostoru,
- uzavření přívodu plynu do prostoru,
- odstavení technologie,
- vypnutí elektrické energie (což nesmí způsobit zhoršení stavu),
- signalizaci o úniku do ústředny elektrické požární signalizace,
- a další.

⁷ ČSN EN 1127-1 ed. 3: Výbušné atmosféry – Prevence a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní pojmy a metodologie

⁸ ČSN EN 60079-10-1 ed. 2: Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry

Logické návaznosti – nastavení

Provozovatelé provádějí vlastní bezpečnostní analýzy, nicméně analýzy nebezpečí by měli provádět i tzv. koordinátoři systému pro zajištění bezpečné návazné operace. Vypnutí by mělo být zahájeno, když je:

- ventilační systém nefunkční,
- detekován únik vodíku,
- zjištěn vysoký průtok plynu,
- zjištěn požár,
- zjištěna provozní odchylka (problémy s přívodem vody, přetlak, nízká nebo vysoká teplota, porucha napájení / klimatizace atd.)

Během nouzového vypnutí by měly být automaticky spuštěno následující⁹:

- Izolace/zábrana skladování volně loženého vodíku,
- Odpojení napájení elektrolyzérů a zastavte výrobu vodíku,
- Odpojení napájení od všech neklasifikovaných elektrických zařízení,
- Bezpečné odpuštění vodíku pod tlakem,
- ventilační systém zůstane zapnutý.

Detekovaným parametrem jsou procenta dolní meze výbuchu (DMV) sledované látky. Detekce může být víceúrovňová, nejčastěji dvouúrovňová s hodnotami 10 % a 20 %, resp. 50 % DMV.

Zařízení s požadovanou funkcí při požáru musí mít navrženo napájení elektrickou energií ze dvou nezávislých zdrojů elektrické energie podle ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody.

K požárně bezpečnostním zařízením musí být vždy předloženy doklady dle Vyhlášky č. 246/2001 Sb. o požární prevenci ve znění pozdějších předpisů.

6.1.4. Detekce požáru

Pro detekci požáru slouží elektrická požární signalizace (dále jen EPS) nebo lokální detekce požáru (dále jen LDP), které musí být navrženy podle ČSN 73 0875¹⁰ a podle dalších norem.

Nutnost detekce vychází z projektového řešení a požadavků ČSN. Např. ČSN P 73 0847 požaduje pro výrobu vodíku přeměnou z elektrické energie instalaci alespoň systému lokální detekce požáru.

V případě požadavku na instalaci elektrické požární signalizace musí být vždy zajištěna trvalá obsluha v počtu 2 osob nebo musí být zřízeno zařízení dálkového přenosu (dále jen ZDP) na pult centralizované ochrany HZS ČR.

⁹ Hydrogen Tools. Safe Shutdown of System Integrators [online]. [cit. 2024-12-02]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/electrolyzer-safety/safe-shutdown-of-system-integrators#ftn.id7>

¹⁰ ČSN 73 0875 Požární bezpečnost staveb – Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení

Zařízení s požadovanou funkčností při požáru musí mít navrženo napájení elektrickou energií ze dvou nezávislých zdrojů elektrické energie podle ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody.

K požárně bezpečnostním zařízením musí být vždy předloženy doklady dle Vyhlášky č. 246/2001 Sb. o požární prevenci ve znění pozdějších předpisů.

6.1.5. Ostatní požárně bezpečnostní zařízení

Nutnost dalších požárně bezpečnostních zařízení (stabilní a polostabilní hasicí zařízení, automatické protivýbuchové zařízení, zařízení pro odvod kouře a tepla, požární klapky atd.) vychází z projektového řešení. Instalaci některých z uvedených zařízení může vyžadovat pojišťovna.

Zařízení s požadovanou funkčností při požáru musí mít navrženo napájení elektrickou energií ze dvou nezávislých zdrojů elektrické energie podle ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody.

K požárně bezpečnostním zařízením musí být vždy předloženy doklady dle Vyhlášky č. 246/2001 Sb. o požární prevenci ve znění pozdějších předpisů.

6.1.6. Větrání

Prostory s výskytem hořlavých plynů musí být vždy vybaveny účinným větráním. Větrání může být přirozené nebo nucené. Pro trvalé větrání skladů hořlavých plynů podle ČSN 07 8304 se požaduje nejméně trojnásobná výměna vzduchu za hodinu.

Podle ČSN P 73 0847 se pro výrobu vodíku přeměnou z elektrické energie požaduje nucené podtlakové větrání s alespoň šestinásobnou výměnou vzduchu za hodinu se zálohovaným napájením elektrickou energií po dobu 30 minut. Větrání je spouštěno na základě signálu od zařízení detekce plynů a par (vodíku).

Konstrukce zařízení větrající prostory z hořlavými plyny musí zabránit jejich vznícení (vznikem jiskry apod.).

6.1.7. Elektroinstalace

Elektrické instalace a zařízení musí být navrženy na základě protokolu o určení vnějších vlivů podle zejména:

- ČSN 33 2000-5-51 ed. 3 Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení – Všeobecné předpisy.
- ČSN EN IEC 60079-10-1 ed. 3 – Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry
- ČSN EN 1127-1 ed. 3 Výbušná prostředí – Prevence a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní koncepce a metodika
- A další příslušné normy a předpisy.

Výrobní technologie musí splňovat požadavky dle Nařízení vlády č. 116/2016 Sb., o posuzování shody zařízení a ochranných systémů určených k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu při jejich dodávání na trh, které v ČR implementuje požadavky Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU (tzv. ATEX 100).

Zařízení s požadovanou funkčností při požáru musí mít navrženo napájení elektrickou energií ze dvou nezávislých zdrojů elektrické energie podle ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody.

6.2. Organizační opatření

Správně nastavené postupy snižují riziko nehod a zajišťují efektivní reakci na mimořádné situace. Mezi hlavní aspekty patří pravidelné hodnocení rizik, školení zaměstnanců, vypracování nouzových plánů, pravidelná údržba zařízení, efektivní komunikace a spolupráce mezi zaměstnanci a vedením, stejně jako provádění auditů bezpečnostních postupů. Hodnocení rizik pomáhá identifikovat potenciální nebezpečí a přijmout odpovídající preventivní opatření. Školení pracovníků zajišťuje jejich připravenost k manipulaci s vodíkem a správné používání ochranných prostředků. Plánování na případné zvládnutí mimořádných událostí vede ke srozumitelným evakuačním postupům. Pravidelná údržba technických zařízení, jako jsou ventily, potrubí a detektory plynů, předchází jejich poruchám a únikům vodíku. Otevřená komunikace podporuje identifikaci rizik na pracovišti, zatímco audity poskytují cennou zpětnou vazbu o účinnosti zavedených opatření.

6.2.1. Doporučená školení

Postupy a plány je třeba nejen zpracovávat a zakládat, ale také s nimi seznámit personál případně další osoby. Pravidelná školení personálu pro řešení krizových situací slouží k osvojení správných reakcí při stresových situacích a snižují dopady takovéto situace.

Mají být realizovány následující školení:

- a) Pravidelná praktická cvičení personálu pro řešení mimořádných událostí, jako je:
 - hašení malých požárů,
 - co dělat v případě poplachu,
 - postupy při úniku plynu,
 - evakuace,
 - ovládání EPS atp.
- b) Cvičení součinnosti s HZS ČR,
- c) Stanovení postupu odstavení provozu, řízení horkých prací (svařování, řezání atd.), povolovací systém pro horké práce a další údržbu.

Součástí školení mají být postupy správného řešení mimořádné události. Včasnou reakcí na požár lze zabránit škodám. V případě vodíkových technologií je podstatné zmínit tyto skutečnosti a specifika:

Vhodná hasiva:

- Nehasit přímo. Požáry vodíku se obvykle hasí až po uzavření přívodu vodíku, protože hrozí nebezpečí opětovného vzplanutí a „exploze“.

Nevhodná hasiva:

- Plný proud vody. Spalování směsi vodíku se vzduchem může být zhoršeno silným rozstříkem vody v důsledku vyvolané turbulence a schopnosti směsi hořet okolo kapek.

Zvláštní nebezpečnost vyplývající z vlastností vodíku nebo směsi:

- Může se vznítit od statické elektřiny.
- Hoří neviditelným plamenem.
- Vodík je lehčí než vzduch a může se shromažďovat v horních částech uzavřených prostor.
- Při vystavení intenzivnímu teplu nebo ohni může dojít k rychlému vypuštění láhve (úniku vodíku) anebo násilnému průrazu. Je nutné ochlazovat láhve a okolí proudem vody.
- Oheň se hasí až po zastavení proudu vodíku. Pokud je to možné, vypíná se / uzavírá zdroj plynu a nechává se oheň sám dohořet.
- Plamen unikajícího vodíku se nehasí, dokud to není absolutně nutné. Může dojít k opětovnému spontánnímu/výbušnému vznícení.
- Hasí se jakýkoliv jiný oheň. Je nutné se vzdálit od nádrže a chladit ji vodou z bezpečného místa.
- Sousední lahve se ochlazují stříkáním velkého množství vody, dokud oheň sám nezhasne. Jsou-li plameny náhodně uhašeny, může dojít k výbušnému vznícení, proto by měla být přijata vhodná opatření (např. úplná evakuace k ochraně osob před střepinami lahve a toxickými výpary) v případě, že by došlo k roztržení.

Plány školení

Součástí dokumentace BOZP a PO je plán školení. V rámci seznámení s provozem, možnými riziky a související dokumentací je též nutné přiblížit si správné reakce na vzniklé mimořádné události. Školení v rámci bezpečnosti je rozděleno na vstupní a periodické, pro vedoucí a řadové zaměstnance. Specifika by měla být určena v plánu školení, který má obsahovat:

- a) popis plánovaných vzdělávacích programů a školení zaměřených na bezpečnost a rizika související s výstavbou / provozem výroby vodíku,
- b) postupy správy školení jednotlivými partnery, včetně zapojení pracovníků do vzdělávacích programů v oblasti bezpečnosti vodíku,
- c) systém záznamu účasti na školeních a způsob ověřování rostoucí úrovně znalostí,
- d) používání osobních ochranných prostředků a náradí (ATEX),
- e) popis externího a interního školení, zahrnující například vzdělávání „školitelů“ prostřednictvím CPD programů a interní školení zaměřená na personál.

6.2.2. Kontroly a jejich frekvence

Zařízení musí být vybaveno provozní dokumentací s v souladu s nařízením vlády č. 378/2001 Sb. Provádí se i kontrola bezpečnosti provozu zařízení před uvedením do provozu.

Mimo to se provozovatel stará o pravidelné vizuální kontroly (alespoň jednou týdně) a údržbu elektrolyzéru, kompresoru a jednotlivých komponent zařízení, včetně potrubí, na základě hodnocení rizik. Nesprávný provoz elektrolyzéru může vést k pronikání kyslíku do vodíkového proudu, což může překročit limitní hodnotu pro riziko výbuchu. Dodržuje se zde pravidlo využití dvou pracovníků (dva páry očí) při údržbě pro snížení rizika lidské chyby.

S cílem snížení lidské chybovosti a správně směřovaným investicím do dalších detekčních systémů lze provést hodnocení jednotlivých zařízení či provozů na základě specifických rizik a jejich možných dopadů, včetně případných škod na zdraví, majetku nebo životním prostředí, s ohledem na zvažovaný typ technologie. Zohlednit je nutno také stavební a technologickou ochranu, stejně jako systémy požární ochrany, poplachové systémy a systémy monitorovací. Konečný počet osobních kontrol technologie je stanoven na základě typu organizace, rizik a ochrany, využít lze například uvedený materiál¹¹. Preventivní údržba je klíčová pro zajištění kontinuity výroby a prevenci nehod. Komponenty s vysokým rizikem většinou tvoří pouze malou část celé výrobní jednotky. Proto by plán kontrol měl stanovit priority na základě hodnocení rizik a zaměřit se na inspekci a údržbu primárně na komponenty s vysokým rizikem, přičemž pro komponenty s nízkým rizikem vyžaduje menší údržbové úsilí, jak vyplývá také z kapitoly 5.

¹¹ Kempna, K., Smolka, J., Kvarcak, M., Kricfalusi, I., Stejskal, Z., Hozjan, T., & Kolaitis, D. (2018). Fire Safety Protection Assessment of Industrial Technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 1107, 042036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1107/4/042036>

6.2.3. Zajištění kontinuity provozu po případné mimořádné události

Pro zajištění kontinuity provozu v případě výpadku části provozu vlivem mimořádné události lze uplatnit principy Business Continuity Managementu (BCM)¹², a to jak ve fázi plánování, tak provozu výroby vodíku. Obecně se zaměřuje na řízení rizik, zajištění kontinuity dodávek a efektivní údržbu technologie, a to s ohledem na potřeby kraje, provozovatelů, průmyslových subjektů. Cílem je vytvořit systém, který bude schopen dlouhodobě a stabilně dodávat vodík jako zdroj energie.

Z hlediska návaznosti na výrobu vodíku lze zohlednit využití vodíku v následujících oblastech:

- Palivo pro veřejnou dopravu, například autobusy, vlaky nebo městské vozové parky.
- Surovina v průmyslu, zejména pro chemické nebo metalurgické aplikace.
- Výroba elektřiny a tepla pro městské aglomerace, průmyslové areály nebo domácnosti.

Provozovatelé a kraje by měli definovat:

- Konkrétní odběratele (města, podniky, energetické společnosti).
- Závazky dodávek, tedy množství vodíku (např. v tunách nebo kWh energie) za dané období, a to včetně způsobu, jak budou tyto dodávky smluvně zajištěny.

V případě nedodržení smluvních podmínek budou ve smlouvách specifikovány sankce, například pokuty za nesplnění objemu dodávek nebo přerušení dodávek.

6.2.4. Řízení odstávek a výpadků technologie

Vodíkové technologie jsou komplexní a vyžadují pečlivé řízení údržby i neplánovaných výpadků. Pro zajištění bezpečnosti při poruchách či nouzových situacích je klíčové mít zavedeny bezpečnostní protokoly a preventivní opatření.

Plánované odstávky:

- Odstávky zařízení na údržbu budou předem definovány a komunikovány odběratelům. Tyto odstávky by měly být zahrnuty do smluvních ujednání jako tolerované období bez dodávek.

Neplánované výpadky:

- Pro minimalizaci rizika neplánovaných výpadků bude provedena analýza kritických míst technologie:
 - o Například elektrolyzéry, které jsou klíčovým prvkem procesu a mohou být citlivé na opotřebení nebo výpadky.

¹² ISO 22301:2019 - Business Continuity Management Systems (<https://www.iso.org/standard/75106.html>)

- Identifikace úzkých hrdel, kde selhání jedné komponenty může ohrozit celou výrobu.
- Smlouvy s dodavateli náhradních dílů zajistí jejich dostupnost v předem stanovených lhůtách. Provozovatel musí mít k dispozici základní sklad klíčových náhradních dílů pro rychlé opravy.

Doba dodání a sankce:

- Pokud dodavatel dílů nebo servisu nedodrží dohodnuté termíny, budou smluvně stanoveny sankce. Maximální tolerované výpadky (např. 14 dní v roce) musí být pevně zakotveny v BCM plánu.

Další informace o řízení výpadků naleznete zde:

- ISO/TS 22317:2015 - Business Impact Analysis
(<https://www.iso.org/standard/50053.html>)

6.2.5. Údržba technologie a predikce selhání

Pravidelná údržba významně ovlivňuje a prodlužuje dobu bezporuchového provozu.

Rozlišujeme dva základní typy údržby:

- Pravidelná údržba probíhá podle pravidelně stanovených intervalů a na základě prediktivních analýz – je třeba stanovit plány údržby,
- prediktivní údržba zahrnuje výměnu komponent podle odhadované životnosti nebo na základě naměřených provozních parametrů.

Údržbu mohou zajišťovat vlastní odborníci provozovatele nebo specializované externí firmy. Provozovatel by měl jasně definovat, kdo je odpovědný za konkrétní úkony a zda jsou k dispozici vyškolení odborníci pro kritické opravy.

6.2.6. Monitoring a bezpečnost provozu

Bezpečnost provozu zajišťujeme mj. monitorovacími systémy s tím, že v případě poruchy nastupuje proces jejich řízení.

Kontinuální monitorovací systémy zařízení sleduje klíčové parametry, jako jsou:

- Teploty, tlakové rozdíly, případně otáčky motoru,
- Termovizní analýzy komponent pro detekci přehřívání,
- Systém musí umožnit online přístup k datům a upozornění na kritické hodnoty.

Řízení poruch:

- V případě poruchy systém automaticky upozorní odpovědné pracovníky a spustí havarijní postupy. Pouze autorizované osoby mohou technologii po opravě znovu spustit.

6.2.7. Kybernetická bezpečnost a další informace

V posledních letech výrazně vzrůstá vliv kybernetického zabezpečení. Zcela základními body jsou:

- Pokud je nutné, aby výrobce technologie prováděl vzdálený servis, přístup bude umožněn pouze přes zabezpečené kanály (např. VPN) a pouze na omezenou dobu.
- Kybernetická bezpečnost bude zajištěna certifikovanými opatřeními, která minimalizují riziko narušení provozu nebo ztráty dat.

Další doporučené podklady a zdroje informací:

- Mezinárodní vodíková organizace (<https://www.ih2a.org/>),
- Energetická strategie ČR (<https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategie/>)
- Hydrogen Europe (<https://hydrogeneurope.eu/>)
- Vodíkové technologie v ČR – MPO (<https://www.mpo.cz/cz/energetika/vodikova-strategie/>)
- Evropská vodíková strategie (https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/hydrogen_en)
- Pro doporučení a standardy monitorování: ISO 55000:2024 - Asset Management (<https://www.iso.org/standard/83053.html>)
- Kybernetická bezpečnost: NIST Cybersecurity Framework (<https://www.nist.gov/cyberframework>)
- Vodíková bezpečnost v EU (<https://hysafe.info/>)

7. Závěr

Historie vodíkové bezpečnosti je dlouhá a sahá od prvních vodíkových balónů až po současný rozvoj využívání vodíku jako nosiče čisté energie a účinného chemického činidla. Vzhledem k vysokému obsahu energie a reaktivitě může být vodík nebezpečný, což je však v různé míře přirozená vlastnost každého paliva nebo zdroje energie. Lidské zkušenosti s elementárním vodíkem jsou dlouhé, vodík objevil irský alchymista Robert Boyle kolem roku 1670 a elektrolytická výroba vodíku je známa od roku 1800.

Oblast výroby vodíku a jeho využití prošla významnou proměnou a ze specializovaných technologií v odvětvích, jako je chemický průmysl, metalurgie a letectví, se stává všudypřítomnou v různých průmyslových odvětvích. V brzké době bude vodíková energetika klíčovým hráčem, což zdůrazňuje potřebu přísných bezpečnostních postupů, které musí doprovázet její široké rozšíření.

Zatímco tradiční průmyslová bezpečnostní opatření byla zaměřena na procedurální aspekty, současný pohled na bezpečnost vodíku uznává, že bezpečnost je vícerozměrný koncept. Přesahuje rámec prostého dodržování postupů a zohledňuje jak vnitřní vlastnosti vodíku, tak vnější okolnosti. Tento komplexní pohled má zásadní význam v době, kdy vodík nabývá na významu v koncepci vodíkového hospodářství, kde je považován za klíčové čisté palivo. Pokračující technologický pokrok představuje dvojí závazek, a to zvýšení účinnosti a posílení bezpečnostních opatření. V souladu s tímto pokrokem zůstává bezpečnost prvořadým zájmem při neustálém vývoji a širokém využívání vodíkových technologií. Oproti dosavadnímu stavu, kdy se bezpečnosti vodíku věnovala pouze úzká skupina specialistů v několika segmentech průmyslu, vede rozvoj vodíkové energetiky a chemie k tomu, že vodík bude přítomen na velkém množství míst a ve značných objemech, v nejrůznějších technologiích, a bude jeho bezpečnost řešit velké množství lidí, počínaje uživateli, přes pracovníky v různých segmentech vodíkového hospodářství, řídicí pracovníky, krizové manažery, inspektory až po politiky a zástupce strategického řízení. Takto generovaná potřeba základních informací o bezpečnosti vodíku vedla ke vzniku tohoto dokumentu jakožto prvního ze série průvodců, který je zaměřen na bezpečnost při výrobě vodíku různými technologiemi.

8. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky

8.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících s výrobou vodíku v České republice

Zákon č. 458/2000 Sb. Energetický zákon

§3 Podnikání v energetických odvětvích

§ 20b Energetické společenství a společenství pro obnovitelné zdroje

Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie

Rozvoj a regulace podporovaných zdrojů energie

§4 Podpora elektřiny z obnovitelných zdrojů

§7 Práva a povinnosti subjektů na trhu s elektřinou z obnovitelných zdrojů, druhotných zdrojů a z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla

§ 11 Podmínky podpory elektřiny a výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů, druhotných zdrojů a vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla

Podmínky pro vydání, evidenci a uznávání záruk původu

§ 44 Záruka původu energie

§ 45 Vydání záruk původu energie

§ 45a Nakládání se zárukami původu energie a jejich evidence

Zákon č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon)

Na vodík je zde pohlíženo jako na chemickou látku

Zákon č. 350/2011 Sb. chemický zákon

§1 zákon upravuje:

a) práva a povinnosti právnických osob a podnikajících fyzických osob (dále jen „osoba“) při

1. výrobě, klasifikaci, zkoušení nebezpečných vlastností, balení, označování, uvádění na trh, používání, vývozu a dovozu chemických látek (dále jen „látky“) nebo látek obsažených ve směsích nebo předmětech,

2. klasifikaci, zkoušení nebezpečných vlastností, balení, označování a uvádění na trh chemických směsí (dále jen „směs“) na území České republiky,

- upravuje práva a povinnosti orgánů státní správy v oblasti uvádění látek nebo látek obsažených ve směsích a v předmětech na trh nebo jejich používání a v uvádění směsí na trh nebo jejich používání

Zákon č. 283/2021 Sb. Stavební zákon

§ 39 Úkoly územního plánování

- f) s ohledem na charakter území a kvalitu vystavěného prostředí vyhodnocovat a, je-li to účelné, vymezovat vhodné plochy pro výrobu; plochy pro výrobu elektřiny, plynu a tepla včetně ploch pro jejich výrobu z obnovitelných zdrojů

vymezovat rovněž s ohledem na cíle energetické koncepce a klimatické cíle státu

§ 298 Působnost - (1) Kontrolu výkonu působnosti - b) Dopravního a energetického stavebního úřadu ve věcech vyhrazených staveb, u nichž vykonává působnost nadřízeného správního orgánu Ministerstvo průmyslu a obchodu, a ve věcech staveb technické infrastruktury pro energetiku a elektronické komunikace, výroben obnovitelných zdrojů energie a staveb souvisejících vykonává Ministerstvo průmyslu a obchodu

Příloha č. 1 - Drobnými stavbami jsou: a) stavby nebo zařízení a jejich údržba, a to stavby pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů s celkovým instalovaným výkonem do 50 kW,

Příloha č. 2 - Jednoduché stavby - m) stavby pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů s celkovým instalovaným výkonem do 100 kW

Příloha č. 3 - Vyhrazené stavby - f) výroby elektřiny o celkovém instalovaném výkonu 100 MW a více,

Zákon č. 76/2002 S. zákon o integrované prevenci – tento zákon stanoví povinnosti provozovatelů zařízení

Vodík uveden v příloze č. 1 – Kategorie činností, bod 4. chemický průmysl, 4.2. Výroba anorganických látek, jako jsou a) plyny, jako čpavek, chlor nebo chlorovodík, fluor nebo fluorovodík, oxidy uhlíku, sloučeniny síry, oxidy dusíku, **vodík**, oxid siřičitý, karbonylchlorid

Způsob stanovení závazných podmínek provozu - § 14, § 15

§ 16 – Základní povinnosti provozovatele zařízení

Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon **o posuzování vlivů na životní prostředí**)

příloha č. 1 - Integrovaná zařízení k průmyslové výrobě základních organických nebo anorganických chemických látek nebo směsí chemickou přeměnou (například uhlovodíky, kyseliny, zásady, oxidy, soli, chlór, amoniak).

Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů

§ 2a Pro účely tohoto zákona se dále rozumí

a) pohonnou hmotou motorový benzin, motorová nafta, zkapalněný ropný plyn, zemní plyn, vodík, biopalivo, biometan nebo jiné palivo z obnovitelných zdrojů nebo směsné palivo,

§ 3 přípustná úroveň znečištění - Imisní limity a přípustné četnosti jejich překročení jsou uvedeny v příloze č. 1

§ 19g Povinnost zajistit minimální množství energie z obnovitelného zdroje za kalendářní rok

Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (**vodní zákon**)

Z hlediska provozu elektrolyzérů je třeba také zajistit příslušné vodoprávní povolení na vypouštění odpadních vod (tzv. demivody, včetně čištění katexů/anexů), jako druhotný

výstup procesu výroby vodíku, jakož i následně vést evidenci takových odpadních vod. V případě nových provozů by měl být zajištěn také dostatečný přívod vody přednostně ve stabilní kvalitě a množství pro účely demineralizace vody prostřednictvím demineralizační jednotky jako obvyklé součásti elektrolyzéro.

§ 8 Povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami

§ 16 Povolení k vypouštění odpadních vod s obsahem zvláště nebezpečné závadné látky nebo prioritní nebezpečné látky do kanalizace

§ 38 Odpadní vody

§ 89 Poplatek za vypouštění odpadních vod do vod povrchových

§ 90 Poplatek za povolené vypouštění odpadních vod do vod podzemních

Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (**zákon o vodovodech a kanalizacích**)

§18 Odvádění odpadních vod

Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů

§ 4 Členění provozovaných činností podle požárního nebezpečí

§ 13 Preventivní požární hlídka

§ 15 Dokumentace požární ochrany

§ 16 Školení a odborná příprava zaměstnanců o požární ochraně

§ 39 Kategorizace staveb z hlediska požární bezpečnosti

Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů, (zákon o prevenci závažných havárií),

§ 6 Zařazení objektu do příslušné skupiny

§ 7 Zařazení objektu do příslušné skupiny pro případ domino efektu

Zpracování bezpečnostní dokumentace

§ 9 Posouzení rizik závažné havárie

§10 Bezpečnostní program

Havarijní dokumentace

§ 21 - 22 Plán fyzické ochrany

§ 23 - 25 Vnitřní havarijní plán

§ 26 - 30 Vnější havarijní plán a zóna havarijního plánování

Příloha č. 1 - Tabulka II výčet vybraných nebezpečných látek a kvalifikační množství nebezpečné látky v tunách. Pro vodík (položka 15) je limitní hodnota 5 t (sloupec 2 - skupina A), respektive 50 t (sloupec B -skupina B), přičemž výpočet hodnot pro tyto limity je uveden v Příloze č. 1 (Minimální množství nebezpečných látek, která jsou

určující pro zařazení objektu do skupiny A nebo skupiny B a pro sčítání poměrného množství nebezpečných látek

Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí

Zásady ochrany životního prostředí (§ 11-16)

Povinnosti při ochraně životního prostředí (§ 17 – 19)

Odpovědnost za porušení povinností při ochraně životního prostředí (§ 27 – 30)

Zákon č. 25/2008 Sb., o integrovaném registru znečišťování životního prostředí a integrovaném systému plnění ohlašovacích povinností v oblasti životního prostředí a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

Integrovaný registr znečišťování životního prostředí a integrovaný systém plnění ohlašovacích povinností v oblasti životního prostředí

Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů

Zákon vymezuje obecnou ochranu přírody a krajiny v rámci které mimo jiné stanovuje základní povinnosti vlastníků a správců pozemku.

Zákon č. 250/2021 Sb. Zákon o bezpečnosti práce v souvislosti s provozem vyhrazených technických zařízení a o změně souvisejících zákonů

Zákon upravuje požadavky na bezpečnost provozu vyhrazených technických zařízení a ochranu zdraví při práci po celou dobu používání vyhrazených technických zařízení; v případě určených druhů již provozovaných vyhrazených technických zařízení stanoví i požadavky na jejich montáž a uvádění do provozu. Zákon dále upravuje práva a povinnosti osob, které u vyhrazených technických zařízení provádějí jejich obsluhu, montáž, údržbu, kontrolu, revize, opravy, plnění nádob plyny nebo je provozují, předpoklady a způsob ověřování odborné způsobilosti osob k činnostem na vyhrazených technických zařízeních a předpoklady a způsob ověřování odborné způsobilosti k výkonu činností osob vykonávajících obsluhu a práci na elektrických zařízeních bez napětí, v blízkosti elektrických zařízení pod napětím a na elektrických zařízeních pod napětím.

Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů (zákon o odpadech)

Zákon upravuje pravidla pro předcházení vzniku odpadu a pro nakládání s ním, práva a povinnosti osob v odpadovém hospodářství a působnost orgánů veřejné správy v odpadovém hospodářství

Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů

Ochrana před hlukem, vibracemi a neionizujícím zářením (§ 30 – 36)

Ochrana zdraví při práci (§ 37- 44)

Nakládání s nebezpečnými chemickými látkami a chemickými směsmi (§ 44a – 44b)

Zákon č. 201/2012., o ochraně ovzduší (zákon o ovzduší)

§ 3 Přípustná úroveň znečištění

§ 4 Přípustná úroveň znečišťování

Vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (**vyhláška o požární prevenci**), ve znění pozdějších předpisů

§ 5 Projektování požárně bezpečnostních zařízení

§ 6 Montáž požárně bezpečnostních zařízení

Nařízení vlády č. 378/2001 Sb., kterým se stanoví bližší požadavky na bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, přístrojů a nářadí

Nařízení specifikuje minimální požadavky na bezpečný provoz a používání zařízení v závislosti na příslušném riziku. Dále konkretizuje podmínky na ochranné zařízení. Podmínky na opravu, seřizování, úpravu, údržbu a čištění zařízení a povinnosti obsluhy těchto zařízení.

Nařízení vlády č. 190/2022 Sb. o vyhrazených technických elektrických zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti

Nařízení stanovuje výčet vyhrazených technických elektrických zařízení, která představují zvýšenou míru ohrožení života, zdraví a bezpečnosti fyzických osob, a jejich zařazení do tříd. Dále stanovuje požadavky kladené na bezpečnost provozu, umístění, montáž, opravy, provoz, prohlídky, revize, zkoušky a provozní dokumentaci vyhrazených elektrických zařízení a požadavky kladené na odbornou způsobilost právnických osob a podnikajících fyzických osob, které provádějí montáž, opravy, revize a zkoušky vyhrazených elektrických zařízení, a na odbornou způsobilost jejich zaměstnanců a dalších fyzických osob, které vykonávají činnosti na vyhrazených elektrických zařízeních.

Nařízení vlády č. 191/2022 Sb., o vyhrazených technických plynových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti, ve znění pozdějších předpisů

Norma stanovuje výčet technických plynových zařízení, která jsou vyhrazená, a jejich zařazení do tříd, skupin a podskupin, požadavky kladené na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na vyhrazených plynových zařízeních, požadavky na zajištění bezpečnosti jejich provozu a požadavky na úroveň bezpečnosti, umístění, provádění montáží a oprav, provozu, kontrol, kontrolních prohlídek, revizí, zkoušek a provozní dokumentace. Dále stanovuje požadavky kladené na způsobilost právnických osob a podnikajících fyzických osob provozujících vyhrazená plynová zařízení nebo osob, které vykonávají montáže, opravy, revize, zkoušky a plnění nádob plyny, a stanoví požadavky na prověřování jejich odborné způsobilosti a požadavky kladené na odbornou způsobilost fyzických osob, které vykonávají na vyhrazených plynových zařízeních montáže, opravy, revize, zkoušky, činnost osoby odpovědné za provoz, obsluhu a kontrolu z hlediska předepsané kvalifikace i doby odborné praxe v oboru a požadavky na prověřování jejich odborné způsobilosti.

Nařízení vlády č. 192/2022 Sb. o vyhrazených technických tlakových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti

Nařízení stanovuje výčet technických tlakových zařízení, která jsou vyhrazená, a jejich zařazení do tříd, požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na vyhrazených tlakových zařízeních, požadavky pro montáže, bezpečný provoz, umístění, opravy,

prohlídky, revize, zkoušky a provozní dokumentaci vyhrazených tlakových zařízení. Dále stanovuje požadavky kladené na způsobilost právnických osob a podnikajících fyzických osob z hlediska potřebného technického vybavení a na odbornou způsobilost jejich zaměstnanců, včetně způsobu prověřování jejich odborné způsobilosti k činnostem na vyhrazených tlakových zařízeních a požadavky kladené na odbornou způsobilost fyzických osob z hlediska předepsané kvalifikace a doby odborné praxe v oboru, včetně způsobu prověřování jejich odborné způsobilosti.

Nařízení vlády č. 193/2022 Sb. o vyhrazených technických zdvihacích zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti

Nařízení stanovuje vyhrazená technická zdvihací zařízení, která představují zvýšenou míru ohrožení života, zdraví a bezpečnosti fyzických osob, a jejich zařazení do tříd. Dále stanovuje požadavky kladené na bezpečnost provozu, umístění, montáž, opravy, kontroly, provoz, prohlídky, revize, zkoušky a provozní dokumentaci vyhrazených zdvihacích zařízení a požadavky kladené na způsobilost právnických osob, odbornou způsobilost podnikajících fyzických osob provozujících vyhrazená zdvihací zařízení a na případnou odbornou způsobilost jejich zaměstnanců a způsobilost dalších právnických osob a odborně způsobilých fyzických osob, které vykonávají činnosti na vyhrazených zdvihacích zařízeních včetně způsobu prověřování jejich odborné způsobilosti k činnostem na těchto zařízeních.

Vyhláška č. 48/1982 Sb., vyhláška ČÚBP, kterou se stanoví základní požadavky k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení.

Vyhláška stanoví základní požadavky k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení, které jsou organizace podléhající dozoru orgánů státního odborného dozoru nad bezpečností práce a právnické a fyzické osoby, které vykonávají podnikatelskou činnost podle zvláštních předpisů ve své výrobní i nevýrobní činnosti povinny zabezpečit.

Nařízení vlády č. 406/2004 Sb. o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu

Nařízení stanovuje způsob organizace práce a pracovních a technologických postupů a bližší požadavky na bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, dopravních prostředků, přístrojů a náradí na pracovištích v prostředí s nebezpečím výbuchu.

Vyhláška č. 441/2012 Sb. Vyhláška o stanovení minimální účinnosti užití energie při výrobě elektřiny a tepelné energie

Vyhláška stanovuje minimální účinnost užití energie pro výstavbu nové výrobní elektřiny nebo tepla nebo pro výrobu elektřiny nebo tepla.

Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování

Vyhláška stanovuje intervaly, způsob a podmínky zjišťování úrovně znečišťování měřeními a výpočtem, způsob vyhodnocení výsledků zjišťování úrovně znečišťování, obecné emisní limity, specifické emisní limity, způsob stanovení emisních limitů pro látky obtěžující zápachem, způsob výpočtu emisních stropů a technické podmínky provozu stacionárních zdrojů a způsob vyhodnocování jejich plnění, způsob stanovení

počtu provozních hodin. Dále stanovuje požadavky na kvalitu paliv, požadavky na způsob prokazování jejich plnění a formát a rozsah ohlašování splnění těchto požadavků, požadavky na výrobky s obsahem těkavých organických látek, náležitosti provozní evidence a souhrnné provozní evidence, provozního řádu, odborného posudku, rozptylové studie, způsob uplatnění kompenzačních opatření a minimální hodnoty příspěvku stacionárního zdroje k úrovni znečištění.

Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací

Nařízení upravuje hygienické limity hluku a vibrací na pracovištích, způsob jejich zjišťování a hodnocení a minimální rozsah opatření k ochraně zdraví zaměstnance, hygienické limity hluku pro chráněný venkovní prostor, chráněné venkovní prostory staveb a chráněné vnitřní prostory staveb, hygienické limity vibrací pro chráněné vnitřní prostory staveb, způsob měření a hodnocení hluku a vibrací pro denní a noční dobu.

8.2. Přehled norem platných v České republice

ČSN EN IEC 60079-0 ed. 5 (332320): Výbušné atmosféry – Část 0: Zařízení – Obecné požadavky.

Norma stanovuje všeobecné požadavky na konstrukci, zkoušení a označování zařízení a součástí, určených pro použití ve výbušných atmosférách.

Norma uvádí pouze požadavky na bezpečnost, které jsou přímo spojeny s nebezpečím výbuchu. Ostatní zdroje iniciace, jako jsou adiabatická komprese, rázové vlny, exotermické chemické reakce, samovznícení prachu, otevřený oheň, horké plyny/kapaliny nejsou touto normou pokryty.

ČSN EN 60079-10-2 ed. 2 (332320): Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry.

Norma uvádí návod pro identifikaci a zařazování prostorů, kde může vznikat nebezpečí od hořlavých prachů. Uvádí základní kritéria, podle kterých může být hodnoceno nebezpečí vznícení a uvádí návod pro navrhování a hlídání parametrů, které mohou být použity pro snížení tohoto nebezpečí. Pro postup použitý pro identifikaci a klasifikaci těchto prostorů jsou uvedena obecná a speciální kritéria. V příloze A jsou uvedeny praktické příklady zařazování prostorů.

ČSN EN 60079-14 ed. 4 (332320): Výbušné atmosféry – Část 14: Návrh, výběr a zřizování elektrických instalací.

Norma obsahuje specifické požadavky pro navrhování, výběr, zřizování a výchozí revize elektrických instalací v nebezpečných prostorech nebo prostorech souvisejících s výbušnými atmosférami. Požadavky normy platí pouze pro použití elektrických zařízení v normálních atmosférických podmínkách.

ČSN EN 60079-17 ed. 4 Výbušné atmosféry - Část 17: Revize a preventivní údržba elektrických instalací

Norma platí pro uživatele a týká se přímo pouze revizí a údržby elektrických instalací v nebezpečných prostorech, pokud toto nebezpečí může být způsobeno přítomností hořlavých plynů, par, mlhy, prachů, vláken nebo polétavých částic.

Norma je určena pro použití tam, kde je nebezpečí v důsledku přítomnosti směsi hořlavého plynu nebo prachu se vzduchem, nebo vrstev hořlavého prachu za normálních atmosférických podmínek.

ČSN EN 60079-32-2 – Výbušné atmosféry – Část 32-1: Nebezpečí od statické elektřiny-zkoušky

Norma popisuje zkušební metody týkající se vlastností zařízení, výrobků a procesů, nutných pro vyloučení vznícení a nebezpečí úrazu při zasažení elektrostatickým výbojem. Účelem této normy je stanovit standardní zkušební metody používané pro ovlivňování statické elektřiny, jako je povrchový odpor, svodový odpor proti zemi, rezistivita prachu, konduktivita kapalin, kapacita a hodnocení zápalnosti vyvolaných výbojů.

ČSN EN ISO/IEC 80079-20-1 - Výbušné atmosféry - Část 20-1: Materiálové vlastnosti pro klasifikaci plynů a par - Zkušební metody a data

Norma uvádí návod na klasifikaci plynů a par. Popisuje zkušební metodu určenou pro měření maximální experimentální bezpečné spáry pro směsi plynu nebo pár se vzduchem za normálních podmínek teploty a tlaku, tak aby bylo možné zvolit správnou skupinu zařízení. Zároveň je zde popsána i zkušební metoda určená pro stanovení teploty vznícení par nebo plynů ve vzduchu při atmosférickém tlaku tak, aby bylo možné zvolit odpovídající teplotní třídu zařízení.

ČSN EN ISO 80079-36 – Výbušné atmosféry - Část 36: Neelektrická zařízení pro výbušné atmosféry - Základní metody a požadavky

Norma stanovuje základní metody a požadavky pro navrhování, konstrukci, zkoušení a označování neelektrických zařízení, součástí, ochranných systémů, přístrojů a sestav těchto výrobků, které mají své vlastní potenciální iniciační zdroje a jsou určeny pro použití ve výbušných atmosférách.

ČSN EN 1127-1 ed. 3 – Výbušná prostředí - Prevence a ochrana proti výbuchu - Část 1: Základní koncepce a metodika

Norma stanovuje metody pro identifikaci a hodnocení nebezpečných situací vedoucích k výbuchu a odpovídající projektová a konstrukční opatření pro požadovanou bezpečnost.

ČSN 73 0804: Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty

Norma platí pro projektování požární bezpečnosti nových stavebních objektů, jejich části a prostorů určených pro výrobu a pro projektování změn staveb stávajících výrobních objektů a prostorů.

ČSN 73 0875: Požární bezpečnost staveb – Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení

Norma platí pro stanovení podmínek pro návrh elektrické požární signalizace, pro vypracování požárně bezpečnostního řešení, které je součástí projektové

dokumentace v jednotlivých stupních dokumentace při projektování nových stavebních objektů a při projektování změn stávajících objektů a technologických souborů a to zejména v návaznosti na požárně bezpečnostní řešení.

ČSN ISO 14687: Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu

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

ČSN EN ISO 17268 (656521): Plyný vodík – Plnicí rozhraní pozemních vozidel

Dokument definuje konstrukční, bezpečnostní a provozní charakteristiky konektorů pro doplňování paliva pro pozemní vozidla s plyným vodíkem. Dokument je použitelný pro konektory pro doplňování paliva, které mají jmenovité pracovní tlaky nebo provoz plnění vodíku do 70 MPa. Norma se nevztahuje na tankovací konektory dávající směsi vodíku se zemním plynem.

ČSN EN ISO 6974-6: Zemní plyn – Stanovení složení s definovanou nejistotou pomocí plynové chromatografie – Část 6: Stanovení vodíku, hélia, kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého a uhlovodíků C1 až C8 pomocí tří kapilárních kolon

Norma popisuje plynovou chromatografii jako metodu pro kvantitativní stanovení obsahu vodíku, hélia, kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého a uhlovodíků C1 až C8 v zemním plynu pomocí tří kapilárních kolon. Je použitelné pro analýzu plynů obsahujících složky v rozmezí molárních zlomků a běžně se používá pro laboratorní aplikace.

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.

ČSN 33 2000-1 ed. 2. - Elektrické instalace nízkého napětí - Část 1: Základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice

Norma určuje základní pravidla pro návrh, stavbu a revize elektrického zařízení nízkého napětí, která zajišťují bezpečnost osob, užitných zvířat a věcí před úrazem a nebezpečím poškození, které může vzniknout při normálním použití tohoto elektrického zařízení. Norma také obsahuje opatření pro řádné fungování těchto zařízení.

ČSN 33 2000-5-51 ed. 3+Z1+Z2 - Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení – Všeobecné předpisy

Norma se zabývá výběrem a instalací elektrického zařízení. Stanovuje společná pravidla pro dodržení ochranných opatření pro bezpečnost, požadavky na správnou funkci pro zamýšlené použití zařízení a požadavky odpovídající předpokládaným vnějším vlivům

ČSN EN ISO 19353 (833251): Bezpečnost strojních zařízení – Požární prevence a požární ochrana

Norma specifikuje metody identifikace požárního nebezpečí vznikajícího u strojního zařízení a provádí odpovídající posouzení rizik. Uvádí základní pojmy a metodologii technických opatření pro požární prevenci a požární ochranu, která musí být dodržena

při konstrukci a výrobě strojního zařízení. Opatření berou v úvahu zamýšlené použití a rozumně předvídatelné nesprávné použití stroje.

ČSN EN 61140 ed. 3 - Ochrana před úrazem elektrickým proudem - Společná hlediska pro instalaci a zařízení

Norma platí pro ochranu osob a zvířat před úrazem elektrickým proudem. Je určena pro poskytnutí základních principů a požadavků, které jsou společné pro elektrické instalace, sítě a zařízení, nebo jsou nezbytné pro jejich koordinaci, a to bez omezení, pokud se týká velikosti napětí nebo proudu nebo druhu proudu a pro kmitočty do 1000 Hz.

ČSN EN 1991-1-4 ed. 2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem

Norma uvádí pokyny pro stanovení zatížení větrem pro navrhování pozemních a inženýrských staveb pro každou z uvažovaných zatížených ploch. Zahrnuje celé konstrukce, části konstrukcí nebo prvky na nich připevněné, tj. dílce, prvky obvodového pláště a zařízení pro jejich upevnění, svodidla a protihlukové stěny.

ČSN EN 1991-1-5 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou

Norma uvádí zásady a pravidla pro výpočet zatížení teplotou u pozemních staveb, mostů a dalších konstrukcí včetně jejich nosných prvků. Poskytuje taky zásady potřebné pro obvodový plášť a další příslušenství budov.

Norma se zbývá teplotními změnami nosných prvků. Uváděné charakteristické hodnoty zatížení teplotou slouží k navrhnutí staveb, které jsou vystaveny klimatickým změnám teplot během dne a ročních období.

ČSN EN 62305-1: Ochrana před bleskem – část1: Obecné principy

Norma poskytuje obecné principy, které by měly být respektovány při ochraně staveb před bleskem, včetně jejich instalací a obsahu, stejně jako osob.

9. Bibliografické zdroje

1. Ayers, K.E. et al. (2010). Research advances towards low cost, high efficiency PEM electrolysis. *ECS Transactions*, 33(1), 3-15.
2. Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, 78(5), 661–669. doi:10.1016/j.solener.2004.09.003.
3. Dos Santos, K. G., et al. (2017). Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 563–571. doi:10.1016/j.rser.2016.09.128.
4. Laguna-Bercero, M. (2012). Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review. *Journal of Power Sources*, 203, 4-16.
5. Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review. *Materials Science for Energy Technologies*. Doi:10.1016/j.mset.2019.03.002.
6. Vincent, I., & Bessarabov, D. (2018). Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1690–1704. doi:10.1016/j.rser.2017.05.258.
7. Alfasfos, R., Sillman, J., & Soukka, R. (2024). Lessons learned and recommendations from analysis of hydrogen incidents and accidents to support risk assessment for the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 60, 1203–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.226>
8. J.X. Wen, M. Marono, P. Moretto, E.A. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, D. Melideo Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database *Int J Hydrogen Energy*, 47 (38) (2022, May), pp. 17082-17096, [10.1016/j.ijhydene.2022.03.170](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.170)
9. M. Spada, P. Burgherr, P. Boutinard Rouelle Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: application to Europe *Int J Hydrogen Energy*, 43 (19) (2018, May), pp. 9470-9481, [10.1016/j.ijhydene.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.004)
10. J.X. Wen, M. Marono, P. Moretto, E.A. Reinecke, P. Sathiah, E. Studer, E. Vyazmina, D. Melideo Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database *Int J Hydrogen Energy*, 47 (38) (2022, May), pp. 17082-17096, [10.1016/j.ijhydene.2022.03.170](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.170)
11. N.R. Mirza, S. Degenkolbe, W. Witt Analysis of hydrogen incidents to support risk assessment *Int J Hydrogen Energy*, 36 (18) (2011, September), pp. 12068-12077, [10.1016/j.ijhydene.2011.06.080](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.080)
12. Lessons learned from recent process safety incidents. (2015, December 21). AIChE. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2015/march/lessons-learned-recent-process-safety-incidents>
13. Hosseini, S.E.; Wahid, M.A. Hydrogen Production from Renewable and Sustainable Energy Resources: Promising Green Energy Carrier for Clean Development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 57, 850–866.
14. El-Emam, R.S.; Özcan, H. Comprehensive Review on the Techno-Economics of Sustainable Large-Scale Clean Hydrogen Production. *J. Clean. Prod.* 2019, 220, 593–609.
15. Okonkwo, E.C.; Al-Breiki, M.; Bicer, Y.; Al-Ansari, T. Sustainable Hydrogen Roadmap: A Holistic Review and Decision-Making Methodology for Production,

- Utilisation and Exportation Using Qatar as a Case Study. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 35525–35549.
15. <https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-production-electrolysis-rectifier-allen-zhou/>
16. Lane, B.; Reed, J.; Shaffer, B.; Samuelsen, S. Forecasting Renewable Hydrogen Production Technology Shares under Cost Uncertainty. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 27293–27306.
17. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_tech_roadmap.pdf
18. Preuster, P.; Alekseev, A.; Wasserscheid, P. Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2017, 8, 445–471.
19. <https://empoweringpumps.com/flowserve-pumping-up-green-hydrogen-production-for-the-energy-transition/>
20. Wanthanee Khetkorn, Rajesh P. Rastogi, Aran Incharoensakdi, Peter Lindblad, Datta Madamwar, Ashok Pandey, Christian Larroche, Microalgal hydrogen production – A review, *Bioresource Technology*, Volume 243, 2017, Pages 1194-1206, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.085>.
21. Zohuri, B. (2019). Nuclear Hydrogen Production Plants. In: *Hydrogen Energy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7_6
22. <https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrogen-Production-from-Nuclear-Energy-via-High-O'Brien-Stoots/3288994738d316330c3434be135147b85d177808>
23. L. Bromberg, D. R. Cohn, and A. Rabinovich, “Plasma reformer-fuel cell system for decentralized power applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 1, pp. 83–94, 1997.
24. L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich, and N. Alexeev, “Plasma catalytic reforming of methane,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 24, no. 12, pp. 1131–1137, 1999.
25. R. R. Davda, J. W. Shabaker, G. W. Huber, R. D. Cortright, and J. A. Dumesic, “Aqueous-phase reforming of ethylene glycol on silica-supported metal catalysts,” *Applied Catalysis B*, vol. 43, no. 1, pp. 13–26, 2003.
26. European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *High adaptation measures: CAPRI*. Minerva. Retrieved December 13, 2024, from <https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt>
27. WHA International. *Case Study: Power Plant Hydrogen Explosion*. 2022, aktualizováno 20. září 2023. Dostupné z: <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>
28. European Hydrogen Safety Panel (EHSP). Statistics, lessons learnt and recommendations from the analysis of HIAD 2.0 database. *Jennifer Wen, Marta Marono, Pietro Moretto, Ernst-Arndt Reinecke, Pratap Sathiah, Etienne Studer, Elena Vyazmina, Daniele Melideo*. Prezentoval Trygve Skjold. European Hydrogen Safety Panel (EHSP), 24.
29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924006505#bib25>

Název:	Bezpečnost při výrobě 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:	69
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Neprodejné	

Tento průvodce obsahuje informace z oblasti bezpečnosti vodíku týkající se procesů a technologií jeho výroby. 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 978-80-248-4847-1 (on-line)

DOI 10.31490/9788024848471