VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Bezpečnost při skladování a transportu 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.

2025

Bezpečnost při skladování a transportu vodíku

Obsah

1. Úvod ke skladování vodíku ... 3
2. Základní vlastnosti vodíku ovlivňující skladování ... 3
3. Přehled technologií skladování vodíku ... 4
3.1. Skladování vodíku v plynné formě ... 4
3.2. Skladování vodíku v kapalné formě ... 6
3.3. Skladování vodíku v pevném skupenství ... 7
3.4. Srovnání a kombinace technologií ... 8
4. Úvod k přepravě vodíku ... 10
5. Způsoby přepravy vodíku v závislosti na jeho formě ... 10
5.1. Přeprava plynného vodíku při vysokém tlaku ... 12
5.1.1. Potrubí ... 12
5.1.2. Tlakové nádoby ... 12
5.2. Přeprava vodíku v kapalném stavu při nízké teplotě ... 13
5.3. Materiály pro přenos vodíku ... 13
5.3.1. Míchání se zemním plynem ... 14
6. Legislativní a regulační požadavky ... 17
6.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících se skladováním a přepravou vodíku v České republice ... 17
6.2. Přehled norem v oblasti skladování a přepravy vodíků platných v České republice 19
7. Řízení rizik a případové studie ... 21
7.1. Identifikované nebezpečné stavy a situace ... 21
7.2. Přehled rizik u jednotlivých technologií a návrhy na bezpečnostní opatření ... 22
7.3. Nehody s vodíkem ... 23
7.3.1. Nehody související se skladováním vodíku ... 24
7.3.2. Nehody související s přepravou vodíku ... 26
7.4. Hlavní příčiny nehod při skladování vodíku ... 30
7.4.1. Hlavní příčiny nehod při přepravě vodíku ... 32
7.4.2. Závěry – poznatky a potřeby vyplývající z případových studií ... 33
8. Bezpečnostní opatření ... 34
8.1. Technická opatření - skladování ... 34
8.1.1. Požadavky na konstrukce ... 35
8.1.2. Odstupové a bezpečnostní vzdálenosti ... 35
8.1.3. Zařízení detekce hořlavých plynů a par ... 38

8.1.4. Detekce požáru 39
8.1.5. Ostatní požárně bezpečnostní zařízení 39
8.1.6. Větrání 39
8.1.7. Elektroinstalace 39
8.2. Technická opatření - při přepravě 40
8.3. Organizační opatření 41
8.3.1. Doporučená školení 41
8.3.2. Kontroly a jejich frekvence 43
8.3.3. Business Continuity Managementu 44
8.3.4. Řízení odstávek a výpadků technologie 44
8.3.5. Údržba technologie a predikce selhání 45
8.3.6. Monitoring a bezpečnost provozu 45
8.3.7. Kybernetická bezpečnost a další informace 45
9. Závěry 47
10. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky 48
10.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících se skladováním a dopravou vodíku v České republice 48
10.2. Přehled norem v oblasti skladování a přepravy vodíků platných v České republice 51
10.3. Příloha B – Příklady nehod s vodíkem ve světě 53
11. Zdroje 62

1. Úvod ke skladování vodíku

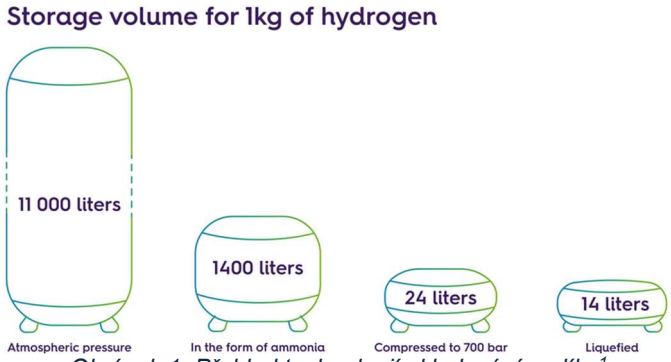
Skladování vodíku je klíčovou aktivitou pro rozvoj vodíkových technologií a technologií palivových článků v aplikacích zahrnujících stacionární napájení, přenosné napájení a dopravu.
Vzhledem k tomu, že vodík je velmi lehký plyn, je jeho skladování zásadní překážkou, kterou je třeba překonat. Ke skladování při nízké teplotě nebo vysokém tlaku jsou zapotřebí technické prostředky.

2. Základní vlastnosti vodíku ovlivňující skladování

Vodík má jednu vlastnost, kterou nelze ignorovat: tento ultralehký plyn (přibližně 11krát lehčí než vzduch, který dýcháme) za normálního atmosférického tlaku zabírá mnohem větší objem než ostatní plyny. Ke skladování 1 kg vodíku je totiž zapotřebí objem přibližně 11 m^3. Vzhledem k tomu, že toto množství umožní vozidlu s vodíkovým pohonem ujet 100 km, je snadné pochopit, proč je jeho skladování v přirozené formě tak komplikované. Proto je třeba zapojit značné technické prostředky, aby se zvýšila jeho hustota a zmenšila velikost skladovacích zařízení. V dnešní době lze vodík stlačit na tlak 700 barů, resp. 350 barů pro přepravu.
Pro skladování vodíku ve formě plynu za vysokého tlaku je možné použít řadu metod:

- v nádržích nebo lahvích, které umožňují přepravu vodíku nákladními automobily,
- v čerpacích stanicích a skladovacích nádržích vodíkových vozidel, kde se pak použije k napájení vodíkového palivového článku, což umožní výrobu elektřiny,
- v masivních podzemních zásobnících.

Vodík je možné skladovat také v kapalném stavu, a to ochlazením na velmi nízkou teplotu. Zkapalněním vodíku se jeho objem dále zmenší. Tato dražší a složitější metoda se však dnes používá pouze pro specifické účely, jako je skladování kapalného vodíku v nádržích na raketové palivo.



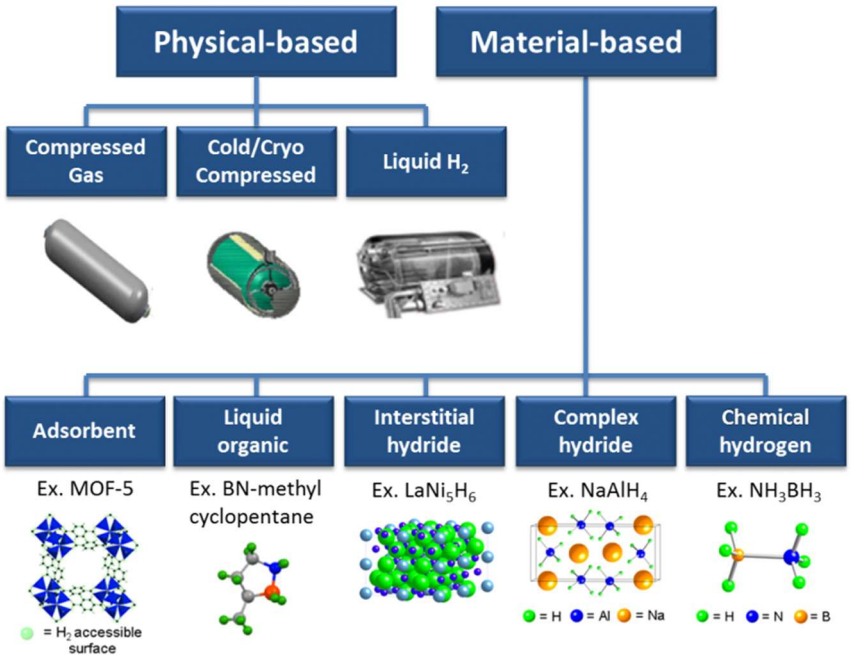
Obrázek 1: Přehled technologií skladování vodíku[1]

[1] https://www.terega.fr/en/our-activities/hydrogen/hydrogen-storage-a-challenge-for-the-development-of-the-industry/

3. Přehled technologií skladování vodíku

Výběr technologie skladování vodíku je kompromisem mezi mnoha kritérii některá z nich jsou ovlivněna vlastností vodíku a také externími faktory (doprava a distribuční infrastruktura, propojení mezi sítí a konečnými uživateli).

Pro skladování vodíku existuje několik technologií, které jsou využívány pro jeho uchovávání jak v plynné, tak kapalné formě. Každá metoda má své výhody a nevýhody, které se liší v závislosti na konkrétních požadavcích, jako jsou kapacita, bezpečnost, náklady a účinnost.



Obrázek 2: Přehled technologií skladování vodíku[2]

Vodík lze skladovat fyzicky jako stlačený plyn, (cGH_2) nebo jako kryogenní kapalinu (LH_2). Systémy skladování plynného vodíku obvykle vyžadují nádoby na stlačený plyn, tj. nádrže (odolávající tlaku až 700 bar). Skladování vodíku v kapalném stavu vyžaduje extrémně nízké teploty, protože jeho bod varu při tlaku 1 atm činí –253 °C. LH_2 se běžně používá pro velkoobjemové skladování a přepravu vodíku (viz přednášku „Úvod do aplikací FCH a vodíkové bezpečnosti“). Vodík se může ukládat také v materiálech: na povrchu pevných látek (adsorpcí), nebo uvnitř pevných látek (absorpcí) [**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**]. Přehled možností skladování vodíku uvádí Obrázek 2.

3.1. Skladování vodíku v plynné formě

V současné době se vodík nejčastěji skladuje jako stlačený plyn v kovových a kompozitních tlakových lahvích pod různým tlakem. Vodík pro průmyslové nebo laboratorní použití se obvykle stlačuje na tlak 15–20 MPa (150–200 bar). V dopravních

[2] https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage

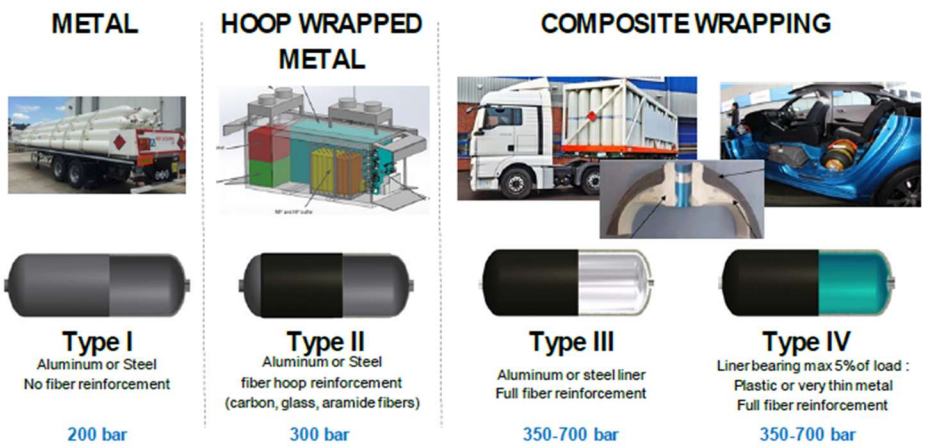
prostředcích s vodíkovým pohonem se vodík pod tlakem 35–70 MPa skladuje v palubních nádržích. Na vodíkových čerpacích stanicích je plynný vodík postupně stlačován (až na 100 MPa) a skladován v zásobnících. Jako příklad lze uvést tři různé úrovně tlaku na čerpací stanici se skladováním plynů: skladování pod nízkým tlakem (v „doutníkových“ nádržích, p = 4,5 MPa), skladování pod středním tlakem (ve svazku lahví, p = 20–50 MPa) a skladování pod vysokým tlakem (v kompozitních lahvích, p = 70–100 MPa). Hlavní obavy týkající se cGH2 jsou následující:

- velké množství energie potřebné ke kompresi,
- namáhání materiálů zásobníků způsobené opakovaným střídáním nízkých a vysokých tlaků,
- bezpečnostní problémy související s používáním tak vysokých tlaků v nádobách,
- vysoké hmotnosti a dodatečné náklady na konstrukci takových nádob.

Je třeba zvážit i další otázky, jako jsou propouštění vodíku a křehkost. Nádoby používané pro skladování cGH2 proto musí být vyrobeny z odolných materiálů a musí odolat vysokým tlakům, aniž by došlo ke ztrátě jejich jímací schopnosti. Existují různé typy zásobníků vodíku, které jsou znázorněny na obrázku 3.

Specifika závisí především na vnitřním maximálním tlaku zásobníku. Nádoby typu I jsou bezešvé nádoby vyrobené z oceli nebo hliníku. Jsou velmi těžké a mají silné stěny. Nádrže typu I jsou určeny pro tlak nejvýše 25 MPa. Nádrže typu I se používají ve vozidlech na stlačený zemní plyn (CNG) a lze je považovat za relativně levnou možnost skladování pro některé stacionární aplikace. Nádrže typu II jsou bezešvé kovové nádoby s obručovitě ovinutým obalem z vkláknito-pryskyřičného materiálu. Jsou také velmi těžké a vydrží tlak až 45–80 MPa. Tyto nádrže lze použít jako vysokotlaké zásobníky na vodíkových čerpacích stanicích. Jejich cena je konkurenceschopná díky relativně nízkému počtu použitých vláken. Nádrže I a typu II nejsou vhodné k použití v automobilovém průmyslu z důvodu velké hmotnosti a rozměrů.

Nádrže typu III a IV jsou obvykle lehčí a mají tenčí stěny než nádrže typu I a II. Nádrže typu III s NWP 35 MPa mají bezešvé nebo svařované hliníkové vložky, plně obalené kompozitem z vláknité pryskyřice. Použité materiály jsou méně ovlivněny vodíkovou křehkostí. Nádrže typu IV s NWP 70 MPa jsou vyrobeny z nekovových (tj. plastových) vložek, na které navazuje vnější nosná vrstva z kompozitních vláken a pryskyřice.

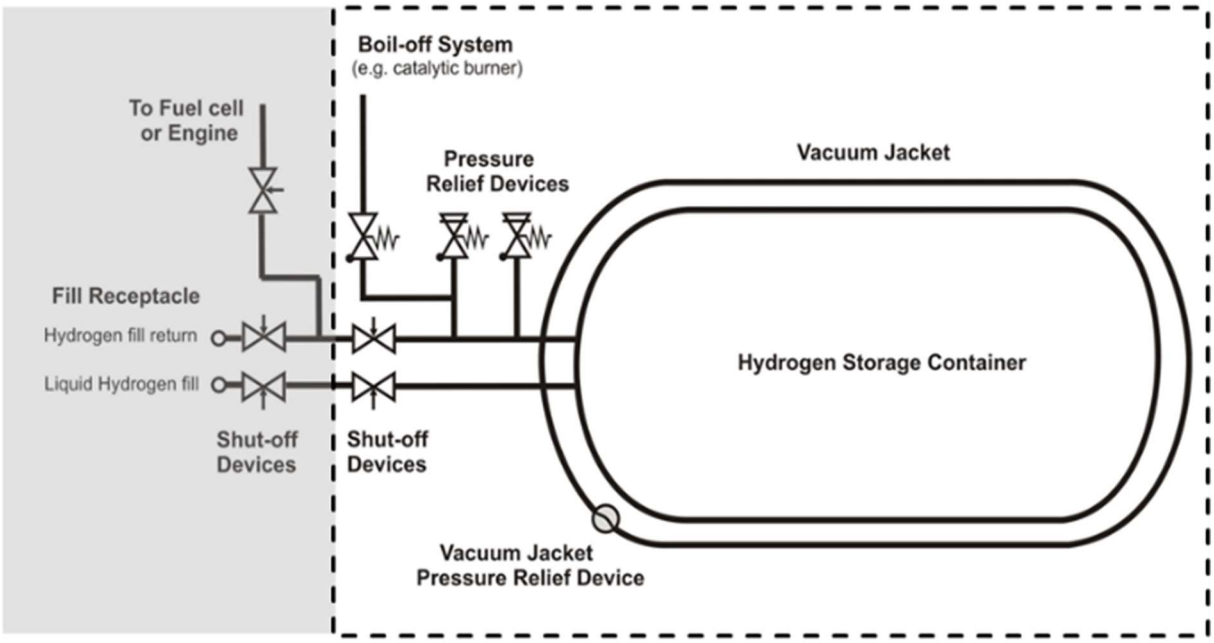


Obrázek 3: Skladování vodíku – typy skladovacích nádob

3.2. Skladování vodíku v kapalné formě

Zásobníky na LH2 pojmou více vodíku než zásobníky na GH_2: objemová kapacita LH_2 činí 0,070 kg/l oproti 0,030 kg/l u zásobníků na GH 2 při tlaku 70 MPa. Ke zkapalnění je však zapotřebí značné množství energie (přibližně 30 % energie obsažené ve vodíku). Vodík může být zkapalněný pro zjednodušení přepravy nebo skladování. Všichni významní dodavatelé průmyslových plynů používají kryogenní cisterny. LH_2 se používá na vodíkových čerpacích stanicích a v leteckých aplikacích.

Zásobník LH_2 je Dewarova dvoustěnná, vakuově izolovaná nádoba vyrobená z lehkých ocelových slitin. Nedochází u ní k permeaci, protože dvoustěnná nádrž udržuje mezi stěnami vakuum. Skladování LH_2 je značně náročné. Přirozené teplo z okolí může vést k zahřívání a varu LH_2 uvnitř nádrže.



Obrázek 4: Schematické znázornění systému skladování LH_2[3]

Kryogenní skladování stlačeného plynu kombinuje skladování vodíku při kryogenních teplotách v nádobě, kterou lze natlakovat (např. na 35 MPa), na rozdíl od současných nádob na LH_2 , které používají tlaky blízké okolnímu prostředí. Skladovat lze kapalný vodík nebo studený stlačený vodík. Tuto technologii, která je stále ve fázi výzkumu a vývoje, vyvinuly Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) a BMW Group. Disponuje těmito výhodami:

- vyšší hustota vodíku ve srovnání s možnostmi skladování LH_2 a GH_2 ,
- potenciální zlepšení hmotnosti, objemu a celkových nákladů na nádrže,
- výrazně nižší teoretická energie kryogenního vodíku v případě protržení nádrže,
- nižší ztráty odpařováním než u nádrží na kapalný vodík a mnohem nižší hmotnost než hydridy kovů

3.3. Skladování vodíku v pevném skupenství

Jak znázorňuje Obrázek 2 lze vodík skladovat buď chemicky nebo fyzikálně vázaný v určitých materiálech viz Tabulka 1. Je známo několik mechanismů ukládání vodíku do materiálů: absorpce, adsorpce nebo chemická reakce. Tato technologie, která je v současné době ve fázi výzkumu a vývoje, nevyžaduje vysoký tlak ani nízké teploty. Na rozdíl od možností skladování cGH2 a LH2 může k náhodnému narušení jímací schopnosti dojít pouze v případě, že dojde k zahřátí materiálů, které vede k uvolnění vodíku

[3] GTR, Návrh globálního technického předpisu (GTR) o vozidlech na vodíkové palivo, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. Organizace spojených národů. Ekonomická komise OSN pro Evropu. Výbor pro vnitrostátní dopravu. Světové fórum pro harmonizaci předpisů pro vozidla, 160. zasedání, Ženeva, 25.–28. června 2013.

Tabulka 1: Škála materiálů používaných pro skladování vodíku v pevných látkách

Uhlík a materiály s velkou povrchovou plochou	Chemické hydridy (hydrolýza)	Dobíjecí hydridy	Chemické hydridy (tepelný rozklad)
• Aktivní uhlí • Nanotrubičky a grafitová nanovlákna • Buckyball klastry • Zeolity • Kovové organické rámce (MOF) • Hydráty plynu	• Zapouzdřený hydrid sodný (NaH) • Hydridy lithia, vápníku a hořčíku • Komplexní hydridy LiALH4; NaAlH4	• Slitiny a intermetalické sloučeniny • Komplexní sloučeniny • Nanokrystaly	• Hydrid hliníku • Boran amonný

Výběr vhodné technologie pro skladování vodíku závisí na specifických potřebách aplikace. Tlakové nádoby a kryogenní skladování jsou vhodné pro mobilní a stacionární aplikace s vyššími nároky na skladovací kapacitu a hustotu energie. Alternativní metody, jako hydridy kovů nebo chemické sloučeniny, mohou nabídnout zajímavé možnosti pro specifické aplikace, kde je důležitá bezpečnost a snadná manipulace.

Nejčastěji využívané technologie pro skladování vodíku zahrnují tlakové nádoby a kryogenní skladování. Tyto dvě metody se osvědčily v různých aplikacích díky své spolehlivosti a širokému využití.

3.4. Srovnání a kombinace technologií

V tabulce 2 je uvedeno srovnání jednotlivých možností skladování vodíku a jejich klíčových vlastností.

Tabulka 2 Srovnání jednotlivých možností skladování vodíku

Možnost skladování	**Teplota skladování (K)**	**Tlak skladování (MPa)**	**Hustota/obsah vodíku (g/L)**	**Energie potřebná pro skladování (kWh/kgH_2)**	**Skladovací nádoba**	**Výhody**	**Omezení**
Stlačený plyn	298,15	Až 70 MPa	39,2 (při 70 MPa)	1,7–6,4	Tlakové nádoby	Nejkonvenčnější metoda	Může docházet k úniku H2
Kryogenní kapalina	20,4	Až 0,7 MPa	70,9 (při 0,1 MPa)	10	Dvouplášťové kryogenní zásobníky	Bezpečnější než tlakové nádoby	Energeticky náročné – Spojeno s plyny při odpařování – Omezeno na vzduch, vesmír a automobilové aplikace
Kryo-stlačené nádrže	20	Až 50 MPa	Až 80 (při 30 MPa)	2,0	Izolované tlakové nádoby	Vysoká hustota energie – Rychlé a efektivní tankování – Vysoká úroveň bezpečnosti	Ve fázi výzkumu a vývoje
Fyzikální adsorpce	70,15	1	Až 5,6 hm.% s $Mg_{95}Ni_5$-TiO_2	6,7	Tlaková nebo izolovaná kovová nádrž vyplněná porézním/nano-strukturovaným materiálem	Rychlá kinetika – Reverzibilita hydrogenace/dehydrogenace	Nízká skladovací kapacita vodíku – Nízké teploty nutné pro vysokou skladovací kapacitu
Chemická absorpce (chemický hydrid)	298,15	Atmosférický tlak	Až 12,1 hm.% při použití metanolu	6,3	Konvenční ocelová nádrž	Poskytuje vysokou hustotu energie – vysoký teoretický výtěžek vodíku při hydrolýze	Nadměrné teplo vznikající při hydrolýze – Nevratnost reakcí dehydrogenace
Chemická absorpce (kovový hydrid)	298,15	Nízký tlak	Až 5,60 hm.% při použití $NaAlH_4$	2,8	Tlaková kovová nádrž	Vysoká hustota energie – Reverzibilita hydrogenace/dehydrogenace	Vyžaduje velkou skladovací kapacitu – Ve fázi výzkumu a vývoje

4. Úvod k přepravě vodíku

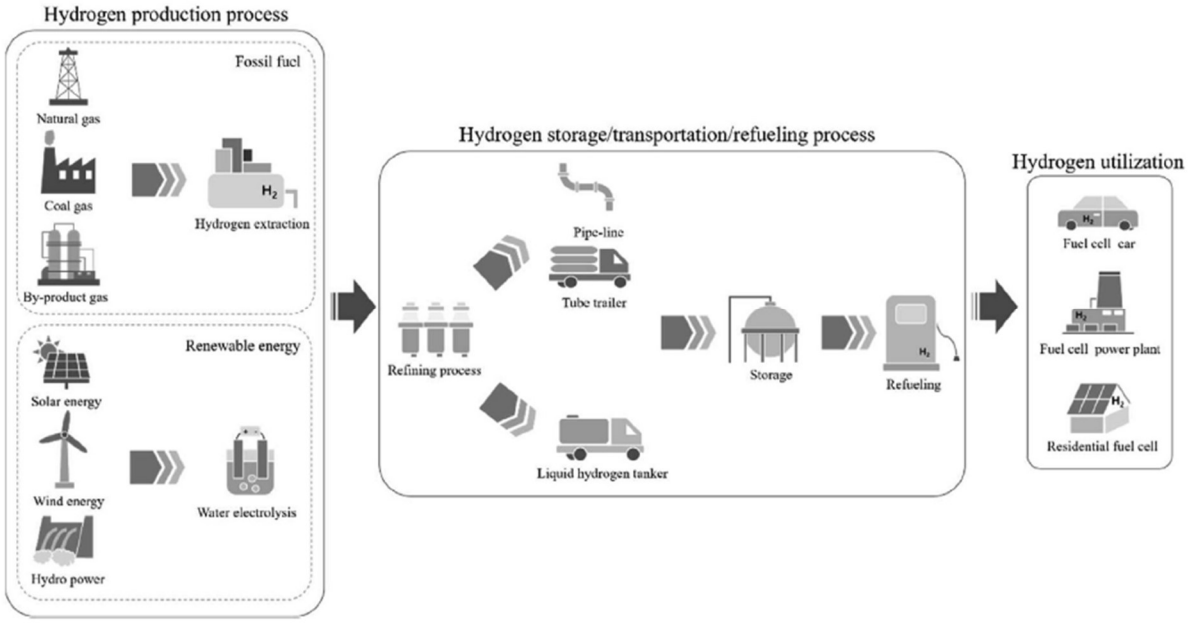
Doprava vodíku, někdy také nazývána transport, a jeho efektivní dodání na místo spotřeby je klíčovou součástí rozvoje vodíkového energetického systému. Existuje několik známých způsobů dopravy různých paliv, přičemž běžně se používají silniční, železniční, námořní doprava a potrubí.
Přeprava vodíku je podstatně dražší než jeho výroba. Nedávná studie, která se zaměřila na čerpací stanice v Kalifornii, ukázala, že výrobní náklady na vodík pomocí parního reformování zemního plynu (SMR) činí přibližně 2–3 $/kg. Naopak aktuální cena za vodík na čerpacích stanicích pro vozidla s palivovými články dosahuje 13–15 $/kg, přičemž náklady na přepravu činí 6–8 $/kg a náklady na čerpací stanici 7 $/kg. Důvody vysokých nákladů na přepravu vodíku zahrnují výstavbu potrubí, energeticky náročnou zkapalňovací technologii, nákladné vysokotlaké kompresory na čerpacích stanicích atd. Z těchto důvodu se vyvíjí mnoho úsilí k nalezení alternativ, například využití stávajících sítí pro přepravu zkapalněného zemního plynu (LNG) k přepravě plynného vodíku nebo vodíkových nosičů a také vývoj vylepšených skladovacích možností, jako jsou nákladní automobily, lodě, čluny a železniční vozy pro přepravu vodíku.

5. Způsoby přepravy vodíku v závislosti na jeho formě

Jedním z nejběžnějších způsobů přepravy vodíku je transport stlačeného vodíku v tlakových nádržích pod tlakem v rozmezí od 15 MPa do 40 MPa po silnici nebo železnici. Přeprava vodíku přímo souvisí s metodami skladování vodíku. Kompaktní formy skladování vodíku jsou obecně ekonomičtější pro přepravu, protože rozptýlené formy jsou objemné a dražší. Přeprava kapalného vodíku je mnohem efektivnější než přeprava plynu pod vysokým tlakem, zejména tam, kde je potřeba přepravovat velké množství. Přeprava vodíku zahrnuje:

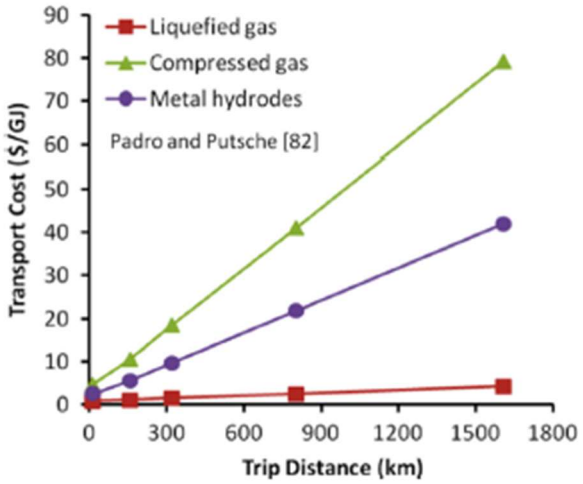
- **Silniční**: Přeprava vodíku po silnici je nejběžnější metodou pro krátké vzdálenosti. Vodík lze skladovat ve vhodných tlakových nádobách přizpůsobených metodě skladování vodíku a dopravnímu médiu. Je také možné použít silniční dopravu pro vodík skladovaný v pevných materiálech.
- **Železniční**: Přeprava vodíku po železnici je podobná silniční dopravě, ale je vhodnější pro delší vzdálenosti a přepravu většího množství.
- **Letecká**: Přeprava kapalného vodíku vzduchem má několik výhod, jako je nízký objem a kratší dodací doba, což znamená, že odpařování není tak vážným problémem. Přeprava stlačeného plynu vzduchem však není kvůli bezpečnostním a hmotnostním omezením žádoucí.
- **Námořní**: Vodík lze přepravovat jako kapalinu v nádržových lodích, které se podobají tankerům pro zkapalněný zemní plyn (LNG), ale vyžadují lepší izolaci, aby vodík zůstal dostatečně ochlazený na dlouhé vzdálenosti. Odpařený vodík lze použít jako palivo na palubě lodi.
- **Potrubní**: Přeprava vodíku potrubím by mohla být účinným způsobem přepravy energie na dlouhé vzdálenosti. Potrubí pro zemní plyn, která se dnes používají, jsou vyrobena z běžné oceli, křehnutí tohoto materiálu omezuje životnost potrubí. Většina stávajících potrubí pro zemní plyn lze také použít k přepravě směsí zemního plynu a vodíku.

Doprava vodíku je klíčovým faktorem ovlivňujícím náklady, spotřebu energie a emise spojené s vodíkovými trasami. Přeprava vodíku k jeho konečným uživatelům se skládá ze dvou hlavních fází: přenos (dodávka vodíku z výrobních závodů k „městským branám“) a distribuce (dodávka vodíku od „městských bran“ na čerpací stanice nebo k samotným koncovým uživatelům), jak znázorňuje Obrázek 5. Na základě zvolené techniky skladování existují tři hlavní způsoby přepravy vodíku: přeprava plynného vodíku při vysokém tlaku, přeprava kapalného vodíku při nízké teplotě a přeprava založená na materiálech s vysokou spolehlivostí. Výběr vhodné metody dodávky závisí na místních a tržních charakteristikách, jako je cílová populace, hustota osídlení, velikost čerpacích stanic, tržní potenciál apod.



Obrázek 5: Celý proces využití vodíkové energie

Náklady na dopravu se zvyšují v závislosti na vzdálenosti dopravy. Náklady na dopravu kapalného vodíku vzhledem k vzdálenosti cesty jsou zobrazeny na obr. 15. Doprava kapalného vodíku je levnější ve srovnání s komprimovaným vodíkem.



Obrázek 6: Náklady na přepravu vodíku na vzdálenost]

5.1. Přeprava plynného vodíku při vysokém tlaku

V tomto způsobu přepravy je plynný vodík dodáván pomocí tlakových nádob na stlačený H2, které jsou uspořádány na přívěsech s trubkami nebo v plynovodech. Tento způsob je vhodný pro přepravu velkého množství vodíku na vzdálenosti delší než 1500 km. Je zvláště zajímavý díky specifickým požadavkům na infrastrukturu, minimálním ztrátám vodíku a nízkým nákladům na kompresi. Pro přepravu plynovody je třeba vybudovat tisíce kilometrů vodíkových potrubí. Alternativně lze využít infrastrukturu pro zemní plyn k přepravě vodíku.

5.1.1. Potrubí

Přeprava vodíku prostřednictvím potrubí je jednou z hlavních metod používaných k transportu vodíku na dlouhé vzdálenosti. Zahrnuje použití specializovaných potrubí, navržených tak, aby bezpečně a efektivně přepravovaly vodíkový plyn z výrobních zařízení do distribučních míst nebo k samotným uživatelům. Potrubí propojují kompresory, městské stanice a skladovací zařízení. Kompresorové stanice hrají klíčovou roli v udržování nepřetržitého toku vodíku, protože dodávají potřebnou energii v rámci přenosového systému, čímž zajišťují, že jsou splněny požadavky na tlak a teplotu.
Přeprava vodíku potrubím přináší řadu výhod. Umožňuje například dodávku vodíku ve velkém měřítku, což je vhodné pro splnění požadavků průmyslových, komerčních i rezidenčních uživatelů. Potrubí zajišťuje nepřetržitou a spolehlivou dodávku vodíku, čímž eliminuje potřebu časté přepravy a skladování. Navíc je tato metoda nákladově efektivní pro velké elektrárny, šetrná k životnímu prostředí a má potenciál pro dlouhodobý provoz potrubí trvající několik desetiletí. Infrastruktura potrubí může být také integrována s existujícími plynovody pro zemní plyn, což umožňuje přestavbu stávající infrastruktury na přepravu vodíku.
Nicméně přeprava vodíku potrubím má také nevýhody. Vodík má odlišné vlastnosti než zemní plyn a vyžaduje specifické materiály potrubí, povlaky a návrhové úpravy, aby se předešlo křehnutí materiálů způsobenému vodíkem a únikům. Bezpečnostní opatření, jako jsou monitorovací systémy, technologie detekce úniků a údržbové protokoly, jsou klíčové pro zajištění integrity potrubí a předcházení nehodám. Kromě toho rozšíření infrastruktury pro přepravu vodíku vyžaduje značné investice a plánování, například při výběru trasy, získávání regulačních schválení a koordinaci se zainteresovanými stranami.

5.1.2. Tlakové nádoby

Tlakové nádoby představují flexibilní a přenosné řešení pro dodávky vodíku do různých míst, zejména pro menší aplikace. V tomto případě je vodíkový plyn stlačen a uložen v lahvích pod vysokým tlakem, vyrobených z odolných materiálů, jako je ocel nebo kompozity, které vydrží tlaky obvykle v rozmezí od 200 do 700 barů. Speciálně navržené vysokotlaké přepravní přívěsy s trubicemi jsou poté použity pro bezpečnou přepravu těchto stlačených lahví nebo nádob s vodíkem při vysokých tlacích. Doprava může také probíhat po silnici, železnici nebo lodí, v závislosti na konkrétních potřebách a dostupnosti vhodné infrastruktury. Po příjezdu na místo jsou plynové láhve připojeny k vodíkovému systému, čímž umožňují přenos stlačeného vodíku do skladovacích

zařízení nebo přímo pro uživatele, například do čerpacích stanic nebo pro průmyslové procesy.
Tlakové nádoby umožňují snadnou přepravu vodíku do míst, kde není dostupná nebo proveditelná infrastruktura potrubí. Nabízejí také praktickou možnost pro dočasné nebo mobilní aplikace, jako jsou čerpací stanice pro vozidla poháněná vodíkem nebo generování energie na odlehlých místech. Na druhou stranu mají tlakové nádoby omezenou kapacitu a pro přepravu velkého množství vodíku by bylo potřeba více lahví a další logistické zajištění. Hmotnost a velikost lahví mohou také představovat výzvy, zejména při přepravě na dlouhé vzdálenosti. Musí být vybudována infrastruktura pro plnění nebo výměnu lahví a je nutné dodržovat předpisy pro přepravu stlačených plynů.

5.2. Přeprava vodíku v kapalném stavu při nízké teplotě

Přeprava kapalného vodíku zahrnuje transport vodíku v kapalném stavu, obvykle při extrémně nízkých teplotách (−253 °C). Kapalný vodík umožňuje efektivnější přepravu velkých objemů vodíku na dlouhé vzdálenosti ve srovnání s plynnou metodou.
Kapalný vodík se plní do specializovaných nádob nebo kryogenních nádrží s izolací, které minimalizují přenos tepla a udržují vodík ve zkapalněném stavu. Tyto nádrže jsou vybaveny systémy na uvolňování tlaku, aby během přepravy udržovaly nízké teploty a tlak. Přeprava kapalného vodíku k uživatelům nebo do skladovacích zařízení probíhá především po silnici, přičemž alternativními způsoby mohou být také železnice nebo lodní doprava, v závislosti na infrastruktuře. Po příjezdu na místo je kryogenní nádrž připojena k systému odběratele nebo skladovacímu zařízení, což umožňuje přenos kapalného vodíku do vhodných skladovacích nádrží nebo zpracovatelských jednotek. Ve většině aplikací je kapalný vodík před použitím zahřát na okolní teplotu.
Přeprava kapalného vodíku nabízí řadu výhod. Kapalný vodík má vyšší energetickou hustotu než plynný, což umožňuje efektivnější přepravu většího množství vodíku s menšími objemy a hmotností. Je to ideální volba pro dálkovou přepravu, protože umožňuje přepravu větších množství vodíku v kompaktní formě. Kapalný vodík minimalizuje ztráty vodíku způsobené difuzí nebo úniky díky kryogennímu skladování a jeho manipulace je obecně jednodušší a bezpečnější než s vysokotlakým plynným vodíkem.
Nicméně přeprava kapalného vodíku má také nevýhody. Udržování kryogenních teplot vyžaduje nákladné specializované vybavení a izolaci. Proces zkapalňování vodíku je energeticky náročný, což vede ke ztrátám energie a vyšším nákladům. Během přepravy dochází k odpařování vodíku, což vede ke ztrátám, a je nutné zajistit neustálé chlazení nebo odvzdušnění. Infrastruktura pro přepravu kapalného vodíku, jako jsou kryogenní jednotky a zařízení, nemusí být široce dostupná. Ačkoliv je kapalný vodík méně náchylný k difuzi a únikům, bezpečnostní rizika vyplývají z extrémně nízkých teplot a hořlavosti. Pro dálkovou přepravu jsou často nutné další opatření a infrastruktura.

5.3. Materiály pro přenos vodíku

Materiály pro přenos vodíku, známé také jako materiály nebo sloučeniny pro skladování vodíku, hrají klíčovou roli při skladování a přepravě vodíkového plynu. Mezi běžné příklady materiálů pro přenos vodíku patří kovové hydridy, amoniak a kapalné organické sloučeniny.

Metal hydridy

Metal hydridy jsou materiály určené pro přenos vodíku, které se používají ke skladování a přepravě vodíkového plynu. Nejprve se vodík spojuje se slitinami tvořícími metal hydridy na místě produkce, což vede k exotermické reakci. Tato reakce způsobí absorpci a uložení vodíku v kovovém hydridovém materiálu. Následně je materiál nasycený vodíkem přepravován na určené místo pomocí běžných dopravních prostředků, jako jsou nákladní vozy, vlaky nebo lodě. Po příjezdu se uložený vodík uvolní zahřátím metal hydridového materiálu.
Poté lze materiál s vyčerpaným obsahem vodíku snadno dopravit zpět na místo výroby, kde může být opět nasycen vodíkem, čímž se vytvoří uzavřený cyklus přepravy. Tento proces umožňuje opakované využívání metal hydridů pro efektivní a bezpečný transport vodíku.

Amoniak

Amoniak slouží jako univerzální materiál pro přenos vodíku a nabízí praktické řešení pro skladování a přepravu vodíku. Tradičně se tento přístup spoléhá na zemní plyn nebo uhlí jako energetický zdroj pro syntézu amoniaku.
Amoniak je efektivní pro skladování a přepravu vodíku díky svému vysokému obsahu vodíku a schopnosti tvořit stabilní kapalinu za mírných tlakových a teplotních podmínek. Na cílovém místě je pak amoniak zpětně přeměněn na vodík prostřednictvím katalytického procesu, což poskytuje spolehlivý zdroj vodíku pro různé aplikace, zejména v chemickém průmyslu.

Kapalné organické nosiče

Kapalné organické nosiče vodíku (LOHCs) jsou chemické sloučeniny používané pro skladování a přepravu vodíku. LOHCs mohou reverzibilně vázat molekuly vodíku prostřednictvím chemických reakcí, což jim umožňuje uchovávat vodík za zvládnutelných podmínek. LOHCs se skládají ze dvou složek: organické sloučeniny s nízkým obsahem vodíku (LOHC–) a organické sloučeniny s vysokým obsahem vodíku (LOHC+).
Vodíkové nosiče mohou usnadnit dodávku vodíku do vzdálených nebo odlehlých lokalit, kde přímé potrubní nebo jiné přepravní metody nemusí být možné. Využití vodíkových nosičů řeší několik výzev spojených s přepravou vodíku v plynném nebo kapalném stavu. Například mnoho vodíkových nosičů má vysoké energetické hustoty, což umožňuje efektivnější přepravu a skladování ve srovnání s plynným nebo kapalným vodíkem [145]. Mají také nižší riziko hořlavosti a výbuchu ve srovnání s plynným nebo kapalným vodíkem, což zvyšuje bezpečnost během přepravy a skladování. Některé vodíkové nosiče, včetně LOHCs a amoniaku, mohou využívat již existující infrastrukturu, jako jsou potrubí, cisternové automobily a lodě, čímž se minimalizuje potřeba rozsáhlých modernizací infrastruktury [212].
Nicméně uvolnění vodíku z těchto nosičů obvykle vyžaduje energetický vstup a může zahrnovat ztráty při konverzi, což ovlivňuje celkovou energetickou účinnost vodíku jako nosiče [213]. Systémy vodíkových nosičů mohou zahrnovat složité chemické procesy a vyžadovat specializované vybavení pro skladování a uvolnění vodíku [214].

5.3.1. Míchání se zemním plynem

Míchání vodíku (novější metoda) označuje praxi míchání vodíkového plynu s jiným palivem, typicky se zemním plynem, za účelem vytvoření směsi paliv před distribucí.

Cílem míchání vodíku je zavedení vodíku do stávající infrastruktury paliv a využití jeho vlastností čisté energie. V kontextu zemního plynu lze vodík míchat se zemním plynem v různých poměrech, jako je 5 – 15 % a až do vyšších hodnot, například 50 %. Výsledná směs je často označována jako „vodíkem obohacený zemní plyn“ nebo „vodíkově směsný zemní plyn“ [144,155,216]. Stojí za zmínku, že směsi obsahující <5–15 % vodíku objemově obvykle nepředstavují větší problémy, v závislosti na konkrétních podmínkách potrubí a složení zemního plynu [144,217]. Nicméně míchání vodíku v rozmezí 15 % až 50 % vyžaduje výraznější úpravy, jako je přestavba velkých domácích spotřebičů nebo zvýšení kapacity komprese na distribuční trase pro průmyslové uživatele [144,218].
K extrakci vodíku ze zemního plynu se využívají různé technologie separace a čištění. Nejčastěji se používají – tlaková adsorpce, membránová separace a elektrochemická separace vodíku [144]. I když je míchání vodíku se zemním plynem v potrubní síti považováno za efektivní způsob přepravy čistého vodíku na trh, zvyšování podílu vodíku ve směsi nad 50 % v zemním plynu přináší řadu problémů, zejména pokud jde o materiály potrubí, bezpečnostní úvahy a potřebu úprav koncových aplikací. Významné náklady spojené s úpravou potrubního systému pro vyšší podíly vodíku je třeba pečlivě zvážit ve srovnání s přínosy přidání vodíku jako součásti směsí se zemním plynem [222].
Nicméně, míchání vodíku do zemního plynu nabízí několik výhod:

- **Dekarbonizace**: Vodík je čistě spalitelné palivo, které při spalování produkuje minimální nebo žádné emise skleníkových plynů. Mícháním vodíku se zemním plynem se snižuje celková uhlíková intenzita palivové směsi, což přispívá k dekarbonizaci energetického sektoru.
- **Kompatibilita infrastruktury**: Míchání vodíku se zemním plynem umožňuje využití stávající infrastruktury pro zemní plyn, včetně potrubí, skladovacích zařízení a distribučních sítí. Tím se minimalizuje potřeba výrazných úprav infrastruktury nebo vytváření samostatných distribučních systémů pro vodík.
- **Flexibilita**: Míchání vodíku poskytuje flexibilitu v úpravě obsahu vodíku na základě specifických požadavků a cílů. Umožňuje postupné zvyšování obsahu vodíku v průběhu času s tím, jak se technologie vyvíjejí a zvyšuje se dostupnost vodíku.
- **Rozvoj trhu**: Míchání vodíku může sloužit jako počáteční krok k širšímu přijetí čistých vodíkových paliv. Pomáhá vytvářet povědomí a zkušenosti s využíváním vodíku, zatímco podporuje rozvoj trhu s vodíkem.
- **Zvýšení energetické bezpečnosti a nákladů**: Míchání vodíku může mít jak pozitivní, tak negativní dopady na energetickou bezpečnost a náklady, v závislosti na různých faktorech a konkrétním kontextu implementace.

Tabulka 3 Srovnání výhod a nevýhod technologií přepravy vodíku

Technologie	Výhody	Nevýhody	Stupeň vývoje	Výhledy
Potrubí	Velká skladovací kapacita. Nízké provozní náklady. Efektivní a spolehlivé.	Vyžaduje vysoké počáteční investice. Omezený dosah na delší vzdálenosti. Vysoká náchylnost k únikům a sabotážím. Omezená kapacita.	Vyspělý	Rozšíření potrubních sítí. Zlepšení materiálů a technologií detekce úniků. Zlepšení 'práva průchodu' v hostitelské komunitě.
Tlakové nádoby	Jednoduchá implementace a rozšíření. Přizpůsobitelná trasa.	Omezená kapacita. Zvýšené náklady na dopravu. Bezpečnostní problémy související se zvýšeným tlakem.	Vyspělý	Materiálová a konstrukční vylepšení ke zvýšení skladovací kapacity. Zavedení pokročilých bezpečnostních opatření a infrastruktury.
Přeprava kapalného plynu	Vyšší energetická hustota. Zavedená technologie.	Kryogenní skladování. Vysoká spotřeba energie.	Pokročilý	Vylepšené izolační materiály. Energeticky účinné procesy.
Kapalné nosiče	Snadná manipulace, přeprava a skladování.	Složité chemické procesy. Energeticky náročné zejména při uvolnění.	Ve vývoji	Pokroky v oblasti nosičů. Efektivní metody uvolňování.
Směs zemního plynu s vodíkem	Snížené emise uhlíku. Využití stávající infrastruktury. Zlepšené spalovací vlastnosti.	Omezený obsah vodíku. Nutnost modernizace infrastruktury. Komprese a separace.	Ve vývoji	Sektorová integrace. Technologický pokrok.

6. Legislativní a regulační požadavky

Kapitola představuje základní legislativní předpisy včetně technických norem, které se vtahují na skladování a přepravu vodíku. Další doplňující legislativní dokumenty jsou uvedeny v příloze A.

6.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících se skladováním a přepravou vodíku v České republice

1. **Předpisy související s energetikou:**

- **Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (energetický zákon)**
  - Tento zákon reguluje podnikání v oblasti energetiky, včetně skladování energií jako je vodík. Upravuje podmínky pro výrobu, přepravu a skladování energií a definuje, kdo a za jakých podmínek může v této oblasti působit.
- **Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií**
  - Tento zákon se zabývá efektivním využíváním energií a podporou obnovitelných zdrojů energie, kam vodík částečně spadá jako alternativní energetický zdroj. Obsahuje také pravidla pro energetickou účinnost a podporu inovativních technologií, včetně skladování vodíku jako energetického nosiče.

2. **Předpisy související s ochranou životního prostředí:**

- **Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší**
  - Tento zákon se zaměřuje na ochranu ovzduší před znečištěním, včetně emisí z provozů, které skladují nebo manipulují s vodíkem. Vodík jako plyn může mít při úniku vliv na kvalitu ovzduší, což vyžaduje přísné regulace.
- **Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon)**
  - Vodní zákon reguluje činnosti, které mohou mít vliv na vodní zdroje a ochranu životního prostředí, včetně provozů, které skladují nebo používají nebezpečné látky jako je vodík. Skladování musí být zajištěno tak, aby nedocházelo ke kontaminaci vod.
- **Nařízení vlády č. 513/1992 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady**
  - V rámci nakládání s nebezpečnými odpady je třeba zahrnout i specifické nakládání s odpady vznikajícími při skladování nebo přepravě vodíku.
- **Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a o omezování znečištění (IPPC)**
  - Tento zákon reguluje provoz zařízení, která mohou mít významný vliv na životní prostředí, a stanovuje povinnost získání integrovaného povolení. Pokud by skladování vodíku představovalo potenciální riziko pro životní prostředí, může být nutné získat povolení podle tohoto zákona

3. **Předpisy související s bezpečností:**

- **Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně**

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

4. Ostatní související předpisy:

- **Zákon č. 183/2006 Sb., stavební zákon**
  - Tento zákon reguluje výstavbu zařízení pro skladování vodíku, včetně získání příslušných stavebních povolení a dodržování technických a bezpečnostních norem.
- **Zákon č. 311/2006 Sb., o pohonných hmotách a o čerpacích stanicích**
  - Zákon upravuje podmínky pro činnosti spojené s distribucí pohonných hmot, včetně vodíkových čerpacích stanic, což je relevantní pro infrastrukturu skladování a distribuce vodíku pro dopravní účely.
- **Zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích**
  - Tento zákon reguluje dopravu, včetně přepravy nebezpečných látek, jakou je vodík. Stanovuje pravidla pro dopravu vodíku po pozemních komunikacích a požadavky na přepravní zařízení, což je důležité i pro přepravu skladovaného vodíku.
- **Vyhláška č. 64/1987 Sb., o Evropské dohodě o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR)**
  - Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR), která je implementována i do české legislativy
- **Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU o tlakových zařízeních**
  - Tato směrnice se vztahuje na tlaková zařízení používaná při přepravě a skladování vodíku, přičemž její požadavky byly implementovány do české legislativy.
- **Nařízení vlády č. 219/2016 Sb. o požadavcích na tlaková zařízení**
  - Doplněk k evropské směrnici 2014/68/EU, který specifikuje požadavky na výrobu, montáž a provoz tlakových zařízení v ČR.
- **Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích**
  - Tento zákon upravuje provoz motorových vozidel na pozemních komunikacích, včetně vozidel poháněných vodíkem, a stanovuje technické požadavky na jejich bezpečnost.
- **Zákon č. 266/1994 Sb. o dráhách**
  - Zákon zahrnuje přepravu nebezpečných látek po železnici, což může zahrnovat přepravu vodíku v tlakových nádobách či cisternách (RID).
- **Zákon č. 350/2011 Sb. o chemických látkách a chemických směsích**

Tento zákon reguluje manipulaci s chemickými látkami a směsmi, včetně vodíku, a stanovuje podmínky pro bezpečnou manipulaci, přepravu a skladován

6.2. Přehled norem v oblasti skladování a přepravy vodíků platných v České republice

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

- Tato norma poskytuje specifické požadavky pro navrhování, výstavbu, provoz a údržbu vodíkových plnicích stanic, včetně skladovacích systémů pro vodík. Je klíčová pro bezpečnostní aspekty při manipulaci a skladování vodíku.

ČSN EN ISO 14687 – Kvalita vodíkového paliva - Specifikace produktů

- Stanovuje specifikace pro kvalitu vodíku, který je určen pro použití v palivových článcích a dalších aplikacích včetně dopravy. Norma obsahuje technické požadavky na čistotu vodíku, což je důležité při skladování, aby se zabránilo znečištění a následným bezpečnostním rizikům.

ČSN EN 17127 - Venkovní výdejní vodíkové čerpací stanice na plynný vodík s plnicími protokoly

- Tato norma se zaměřuje na bezpečnostní požadavky, konstrukci a provoz vodíkových plnicích stanic, včetně zařízení pro skladování vodíku. Definuje také standardy pro bezpečnostní systémy a monitorování úniků.

ČSN EN ISO 11114-1 - Lahve na plyny - Kompatibilita materiálů lahve a ventilu s plynným obsahem - Část 1: Kovové materiály

- Tato norma stanoví požadavky na kovové materiály používané v tlakových nádobách a dalších skladovacích zařízeních pro vodík, aby se zajistila jejich bezpečnost a dlouhodobá spolehlivost.

ČSN EN 12007-1 - Zařízení pro zásobování plynem - Plynovody s nejvyšším provozním tlakem do 16 bar včetně - Část 1: Obecné funkční požadavky

- Tato norma obsahuje specifikace pro plynovody, které mohou být používány i pro distribuci a skladování vodíku při nízkém tlaku.

ČSN EN 13445-2 - Netopené tlakové nádoby - Část 2: Materiály

- Tato norma se zabývá technickými a bezpečnostními požadavky pro tlakové nádoby, které mohou být použity i pro skladování vodíku. Zajišťuje, že nádoby budou bezpečné a odolné vůči vysokému tlaku vodíku.

ČSN EN ISO 16110-1 - Vodíkové generátory využívající technologie zpracování paliv - Část 1: Bezpečnost

- Tato norma se týká bezpečnostních požadavků na generátory vodíku, které jsou používány ve skladovacích a produkčních zařízeních. Týká se jak výroby, tak skladování a přepravy vodíku.

ČSN EN 13648-1 - Kryogenické nádoby - Bezpečnostní zařízení na ochranu proti nadměrnému tlaku - Část 1: Pojistné ventily pro provoz s nízkými teplotami

- Tato norma se zaměřuje na bezpečnostní ventily používané v kryogenních nádobách pro skladování kapalného vodíku. Zajišťuje, že tyto nádoby jsou vybaveny zařízeními, která zabraňují nadměrnému tlaku a zajišťují bezpečnost při skladování za nízkých teplot.

23. ČSN EN ISO 11114-4 - Lahve na přepravu plynů - Kompatibilita materiálů lahve a ventilu s plynným obsahem - Část 4: Zkušební metody pro výběr ocelí odolných proti vodíkovému křehnutí

- Stanovuje požadavky na kompatibilitu plastových materiálů, které jsou používány v kontejnerech pro skladování vodíku, s ohledem na jejich odolnost vůči vodíku a související bezpečnostní aspekty.

ČSN EN 13096 - Lahve na přepravu plynů - Podmínky plnění plynů do nádob - Jednotlivé složky plynů

- Tato norma se zaměřuje na konstrukční a provozní požadavky pro kryogenní nádoby, které slouží ke skladování kapalného vodíku. Zahrnuje specifikace týkající se bezpečnosti a technických parametrů pro nádoby při velmi nízkých teplotách.

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 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 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

ČSN EN 1594 – Zařízení pro zásobování plynem – Plynovody s nejvyšším provozním tlakem nad 16 bar - Funkční požadavky

- Tato norma se vztahuje k přepravě plynných látek, včetně vodíku, vysokotlakými plynovody. Popisuje bezpečnostní a technické požadavky pro vysokotlaké potrubní systémy.

ISO/TR 15916 – Základní pohledy na bezpečnost vodíkových systémů

- Tato technická zpráva poskytuje obecné pokyny pro bezpečné používání vodíku v různých aplikacích, včetně skladování a přepravy.

ČSN EN 12213 – Kryogenické nádoby – Postupy pro hodnocení účinnosti tepelné izolace

- Tato norma určuje praktický postup pro stanovení tepelného příkonu u kryogenických nádob. Metoda zahrnuje měření jak na otevřených, tak i na uzavřených systémech.

ISO 26142 – Vodíkové detekční systémy – Požadavky na detekci úniků

- Norma upravuje systémy pro detekci úniků vodíku z přepravních nebo skladovacích zařízení, což je klíčový bezpečnostní prvek pro přepravu tohoto plynu.

7. Řízení rizik a případové studie

7.1. Identifikované nebezpečné stavy a situace

Jsou identifikovány základní typy známých nebezpečných situací při různých, ale již rozvinutějších, způsobech při skladování vodíku.
Vzhledem k nízké hustotě plynného vodíku a jeho fyzikálně-chemickým vlastnostem je nutné využívat specializované technologie, které umožní jeho bezpečnou manipulaci. Mezi hlavní technologie přepravy a skladování vodíku patří potrubní transport, tlakové nádoby, přeprava kapalného vodíku, kapalné nosiče (LOHC) a směs zemního plynu s vodíkem. Každá z těchto metod má své výhody, ale i specifická rizika, která je třeba efektivně mitigovat.

Potrubní přeprava je efektivním způsobem transportu vodíku na dlouhé vzdálenosti, avšak vyžaduje odolné materiály, které eliminují riziko vodíkového křehnutí a netěsností. Vodík je v potrubí přepravován pod vysokým tlakem, což zvyšuje nároky na bezpečnostní opatření. Moderní plynovody mohou být upraveny na transport směsí vodíku a zemního plynu, avšak při vyšších koncentracích H_2 jsou nutné technologické úpravy. Riziky jsou především:

- Vodíkové křehnutí potrubí a armatur.
- Netěsnosti a úniky plynů.
- Možnost vzniku výbušné směsi při úniku.

Skladování vodíku v **tlakových nádobách** je běžnou metodou pro malé a střední objemy. Vodík je stlačován na tlak 35–70 MPa a skladován v ocelových nebo kompozitních lahvích. Tato metoda je vhodná pro mobilní aplikace a průmyslové využití. Riziky jsou především:

- Vysoký tlak může vést k prasknutí nádoby.
- Vodíkové křehnutí materiálu.
- Tepelné namáhání při požáru.

Kapalný vodík (LH_2) se přepravuje v kryogenních cisternách při teplotě –253 °C. Tato metoda umožňuje efektivnější přepravu velkých objemů vodíku než kompresní skladování. Riziky jsou především:

- Extrémně nízké teploty mohou způsobit křehnutí materiálů.
- Odpařování kapalného vodíku vede k tlakovému nárůstu v nádrži.
- Možnost vznícení a výbuchu při úniku.

Kapalné organické nosiče vodíku umožňují skladování a přepravu vodíku při okolní teplotě a tlaku. Vodík je chemicky vázán na kapalnou látku a zpětně uvolňován v místě spotřeby. Riziky jsou především:

- Hořlavost a toxicita nosičů.
- Energetická náročnost procesu uvolňování vodíku.
- Možnost vzniku požáru při úniku kapaliny.

Vodík může být **přimícháván do zemního plynu** a distribuován stávajícími plynovody. Tato metoda je výhodná pro postupnou integraci vodíku do plynárenské infrastruktury. Riziky jsou především:

- Vodíkové křehnutí ocelových potrubí.
- Zvýšené úniky plynů skrz netěsnosti.
- Změna vlastností spalování v koncových spotřebičích.

Identifikované nebezpečné stavy a situace

Vysoké provozní tlaky a teploty

- Tlakové nádoby: Vysoké provozní tlaky (až 70 MPa) zvyšují riziko mechanického selhání, zejména při materiálové degradaci nebo přehřátí nádoby.
- Přeprava kapalného vodíku: Kryogenní teploty (-253 °C) mohou vést ke křehnutí konstrukčních materiálů, což zvyšuje riziko netěsností.

Koroze a degradace materiálů

- Potrubí: Vodíkové křehnutí ocelových potrubí a armatur vede k tvorbě mikrotrhlin a postupnému oslabení mechanické pevnosti.
- LOHC systémy: Degradace kapalného nosiče vlivem opakovaných cyklů hydrogenace/dehydrogenace může vést ke vzniku nebezpečných vedlejších produktů.

Únik plynů a směšování

- Potrubí a tlakové nádoby: Netěsnosti v systému mohou vést k úniku vodíku a tvorbě výbušné atmosféry.
- Směs zemního plynu s vodíkem: Zvýšená difuzivita vodíku oproti metanu zvyšuje riziko úniků.

Nebezpečí při skladování a přepravě

- Kapalný vodík: Rychlé odpařování při poruše izolace nebo narušení nádrže vytváří tlakové rázy a zvyšuje riziko exploze.
- LOHC: Únik hořlavého organického nosiče při manipulaci může způsobit požár nebo kontaminaci prostředí.

Ekologická a zdravotní rizika

- LOHC: Některé nosiče mohou být toxické nebo ekotoxické, což vyžaduje přísnou kontrolu manipulace a likvidace.

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

Tabulka 4 konkretizuje jednotlivá rizika u základních technologií při přepravě a skladování vodíku, včetně návrhů bezpečnostních opatření.

Tabulka 4 Přehled rizik a opatření pro jednotlivé technologie skladování a přepravy vodíku

Technologie	Klíčová rizika	Bezpečnostní opatření
Potrubí	Vodíkové křehnutí materiálu, úniky a netěsnosti, požár a výbuch	Použití odolných materiálů, pokročilá detekce úniků, svařované spoje, rychlé uzávěry, pravidelné inspekce, monitoring infrastruktury

Tlakové nádoby	Vysoký tlak (riziko exploze), vodíkové křehnutí, netěsnosti, tepelné namáhání	Konstrukce dle norem, tlakové pojistky (PRD), požární ochrana, vzdálené a větrané skladování, pravidelné revize, školený personál
Přeprava kapalného vodíku (LH_2)	Extrémní nízké teploty (omrzliny, křehnutí materiálů), odpařování, požár, obohacení kyslíkem	Kryogenní materiály a konstrukce, odvětrávací systémy, detekce úniků a vodíkového plamene, protipožární ochrana, školení personálu
Kapalné nosiče (LOHC)	Hořlavost nosiče, toxicita, riziko požáru při dehydrogenaci	Skladování jako hořlaviny (záchytné vany), detekce par, ATEX prostředí, monitorování procesu, požární ochrana, OOPP pro personál
Směs zemního plynu s vodíkem	Vodíkové křehnutí potrubí, úniky, změna vlastností plynu, vyšší riziko výbuchu	Omezení podílu vodíku, materiálové úpravy sítě, kompatibilní spotřebiče, častější kontroly úniků, školení personálu, aktualizace havarijních plánů

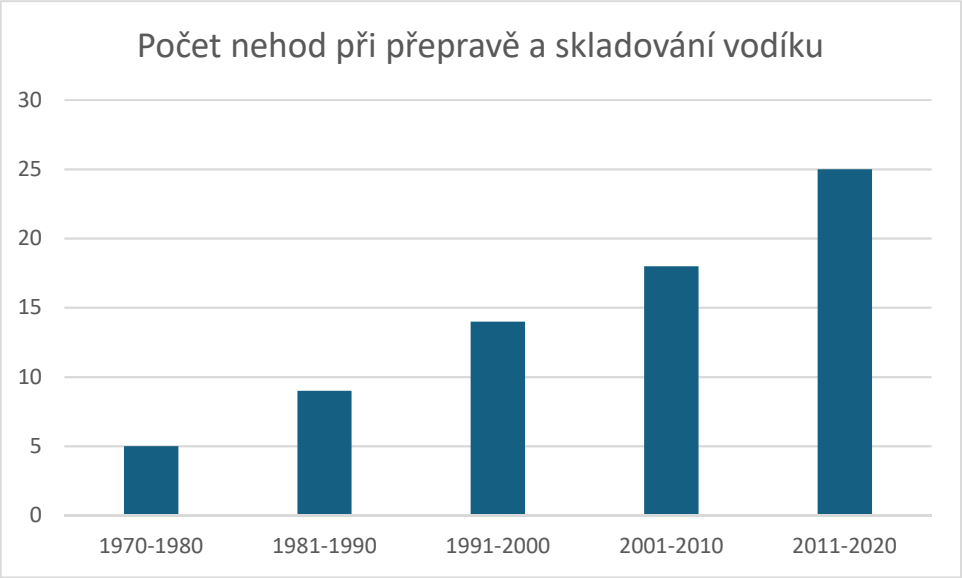
7.3. Nehody s vodíkem

Navzdory přísným bezpečnostním opatřením došlo v minulosti i současnosti k několika závažným nehodám spojeným s přepravou i skladováním vodíku. Uvádíme zde vybrané příklady takových incidentů napříč různými způsoby přepravy (silniční, železniční, potrubní) i ve skladovací infrastruktuře, včetně jejich příčin, následků a bezpečnostních opatření přijatých po nehodě.

Počet zaznamenaných incidentů při porovnání od 80. let je rostoucí. Neznamená to nicméně nutně zhoršení bezpečnosti. Je to spíše odraz rostoucího objemu využití vodíku, lepší evidence a širšího záběru monitorovacích systémů. Počet vážných nehod s oběťmi nebo rozsáhlými škodami má v posledních letech spíše klesající tendenci díky lepším technologiím, přísnějším normám a lepšímu školení obsluhy.

Tento trend je ovlivněn několika faktory:

1. Výrazné rozšíření využití vodíku. V minulosti byl vodík využíván primárně v průmyslu, dnes roste jeho role v dopravě a energetice. Více aplikací znamená více zaznamenaných incidentů.
2. Zlepšení monitoringu a povinnost hlášení. S příchodem směrnic Seveso II a III a podobných předpisů se zvýšila transparentnost a evidenční povinnost, což vede ke statistickému růstu.
3. Rozšíření mezinárodních databází, které dnes sbírají i méně závažné události (tzv. near misses), což se dříve nedělo.
4. Rostoucí komplexita technologií, kdy nové aplikace, jako jsou vysokotlaké plnicí stanice nebo kryogenní přeprava, přinášejí nová specifická rizika.



Obrázek 7: Počet nehod při přepravě a skladování vodíku[4]

Pokud byly k dispozici oficiální vyšetřovací zprávy či závěry regulačních orgánů, jsou uvedeny jako zdroje.

7.3.1. Nehody související se skladováním vodíku

Exploze zásobníku vodíku, Gangneung, Jižní Korea (2019)

Vodík skladuje nejen v průmyslu, ale i v rámci nových technologií (např. akumulace energie). K závažné nehodě došlo 23. května 2019 v experimentálním centru *Gangwon Technopark* ve městě Gangneung, kde probíhal test provozu vodíkového palivového článku napojeného na soustavu velkých tlakových zásobníků vodíku. V důsledku chyby v provozním postupu pronikl do jednoho ze zásobníků kyslík, který se smísil s uskladněným vodíkem.[5] Uvnitř ocelové nádrže (o objemu 40 000 l) tak vznikla vysoce výbušná směs, která se následně vznítila – pravděpodobně elektrostatickou jiskrou nebo jiným iniciačním zdrojem (to se nepodařilo jednoznačně prokázat). Následovala silná exploze uvnitř zásobníku (odhadovaná síla výbuchu odpovídala ~50 kg TNT), která zcela zničila betonovou

[4] https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt, https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr, https://h2tools.org/lessons

[5] https://proceedings.aiche.org/chs/conferences/international-center-hydrogen-safety-conference/2019/proceeding/paper/review-hydrogen-tank-explosion-gangneung-south-korea#:~:text=hydrogen%20storage%20steel%20tanks%20of,of%20accident%20will%20be%20presented

budovu areálu; dva technici bohužel zahynuli a šest dalších osob utrpělo zranění.[6] Tlaková vlna navíc vážně poškodila okna a konstrukce budov v okruhu více než 100 metrů od místa exploze. Jihokorejské úřady okamžitě zahájily vyšetřování – zjistilo se, že příčinou bylo vniknutí kyslíku do vodíkové nádrže vlivem chyby v postupu (nedostatečné odplynění/purifikace systému). Po nehodě vláda dočasně pozastavila některé projekty vodíkových technologií a provedla audit bezpečnostních protokolů. Byla zpřísněna pravidla pro provoz experimentálních vodíkových zařízení – např. povinné instalace systémů detekce přítomnosti kyslíku či jiných nečistot v nádržích, důsledné inertizace (proplachování inertním plynem) před plněním vodíkem a školení obsluhy na rizika tzv. *nezáměrného vytvoření výbušné atmosféry* uvnitř skladovacích nádob.

Exploze plnicí stanice, Kjørbo, Norsko (2019)

S rozvojem vodíkové mobility se vodík skladuje také v síti čerpacích a plnicích stanic pro palivové články. Dne 10. června 2019 došlo k výbuchu na vodíkové plnicí stanici v Kjørbo nedaleko Osla. Příčinou byla technická závada na vysokotlakém skladovacím systému – konkrétně montážní vada u jedné z tlakových nádob, kde špatně sestavená zátka (šroubovací uzávěr) způsobila netěsnost.[7] Z poškozené zásobní tlakové nádrže začal unikat vodík, který vytvořil v okolí stanice oblak výbušné směsi a ten se po chvíli vznítil. Následná exploze zničila celou technologii stanice a poškodila i okolní objekty; dvě osoby v nedalekém vozidle utrpěly lehká zranění vlivem tlakové vlny (aktivovaly se airbagy). Provozovatel stanice, firma Nel Hydrogen, ve spolupráci s nezávislým konzultantem (Gexcon) provedl podrobnou analýzu události. Ta potvrdila chybnou montáž jako kořenovou příčinu a identifikovala i konkrétní vadný díl. Bezprostředně po zjištění příčiny firma preventivně uzavřela obdobné stanice a zahájila kontrolu všech vysokotlakých skladovacích jednotek stejného typu. Vadné komponenty byly vyměněny a Nel zavedl přísnější montážní postupy, včetně vícestupňové kontroly správné instalace a nové dokumentace ke každému spoji. Norský inspekční orgán navíc celý případ prověřil a v roce 2021 udělil provozovateli pokutu 25 mil. NOK za porušení bezpečnostních předpisů. Tato nehoda vedla k zavedení přísnějších standardů pro výstavbu a provoz vodíkových čerpacích stanic po celém světě – např. zlepšení konstrukce zásobních nádob (odlišné řešení kritických uzávěrů), robustnější systémy detekce úniků a důraz na pravidelné revize zařízení. Díky přijatým opatřením mohly být vodíkové stanice po několika týdnech opět zprovozněny.

[6] https://cleantechnica.com/2025/01/16/korean-hydrogen-explosions-leaks-auction-failure-impeachment-may-cause-pivot/#:~:text=This%20is%20far%20from%20the,tanks%2C%20leading%20to%20the%20explosion

[7] https://nelhydrogen.com/press-release/nel-asa-status-update-5-regarding-incident-at-kjorbo/#:~:text=The%20preliminary%20Gexcon%20investigation%20shows,the%20specific%20source%20of%20ignition

7.3.2. Nehody související s přepravou vodíku

Silniční přeprava

Výbuch a požár při plnění přívěsu na přepravu vodíku v Santa Claře, Kalifornie, červen 2019

Nedostatky při plnění víceválcového přívěsu plynným vodíkem v zařízení na skladování a přepravu plynu v Santa Claře vedly k výbuchu a následnému požáru proudu. Ačkoli nebyli hlášeni žádní zranění, výbuchy byly cítit až do vzdálenosti osmi kilometrů.

Obrázek 8: Záběry víceválcového přívěsu na kamionu po incidentu v Santa Claře

Při plnění přívěsu s trubkami došlo k úniku. Jeden z řidičů se pokusil o neoprávněnou opravu netěsného ventilu. Personál nedodržel správné postupy a nedorozumění mezi oběma řidiči vedlo k opětovnému otevření pneumatického ventilu, což umožnilo proudění vodíku do odpojené rozdělovací trubky. Vodík se hromadil v uzavřeném prostoru s nedostatečným odvětráváním a vytvářel hořlavou směs vzduchu a vodíku. Tato směs se vznítila a došlo k výbuchu. Po výbuchu následoval požár proudu a další požáry vodíku pokračovaly v důsledku aktivace několika těsnění přetlakového zařízení (PRD) a poškozených O-kroužků.

Exploze při plnění zásobníků, Muskingum River, Ohio (2007)

Stalo se 8. ledna 2007 v uhelné elektrárně Muskingum River v Ohiu, kde se vodík používá k chlazení generátorů. Při dodávce stlačeného vodíku silniční cisternou do stacionárních zásobníků došlo k přetlakování systému a roztržení bezpečnostní membrány na jednom ze zásobníků. Vodík unikal odfukovým potrubím nad střechu budovy, avšak měděné odvodné potrubí prasklo v koleně pod úrovní střechy – plyn se tak hromadil pod stropem haly, kde se následně vznítil a explodoval. Tragédie si vyžádala život řidiče cisterny a zranila 8 dalších zaměstnanců. Vyšetřování Úřadu pro bezpečnost práce (OSHA) odhalilo konstrukční a organizační nedostatky: použité měděné potrubí nebylo schopné odolat proudění vodíku při náhlém odfuku a v

konstrukci střechy chybělo dostatečné odvětrání pro případ úniku. Po nehodě provozovatel nahradil měděné odfukové potrubí odolnější ocelovou variantou a upravil konstrukci budovy tak, aby se unikající vodík nemohl hromadit pod střechou. Zavedena byla přísnější inspekce a údržba bezpečnostních membrán a ventilů; mateřská společnost dostala v následném soudním sporu za prokázané zanedbání bezpečnostních opatření vůči vodíkovému systému citelnou pokutu.[8],[9]. Tato nehoda vedla energetický sektor k revizi standardů pro instalaci a údržbu vodíkových zařízení v elektrárnách.

Výbuch při vykládce lahví, Stockholm (1983)

Dne 3. března 1983 došlo v centru Stockholmu k explozi během vykládání ocelových tlakových lahví s vodíkem z nákladního automobilu. Nejprve došlo k úniku vodíku z jedné z lahví (pravděpodobně vlivem netěsnosti či poškození při manipulaci) a následně se vytvořená směs vzduchu s vodíkem vznítila. Exploze rozbila okna v okruhu 90 metrů a zranila 16 osob. Vyšetřování poukázalo na nutnost důslednějších opatření při přepravě tlakových lahví – po nehodě byly zpřísněny postupy pro manipulaci v obytných zónách, včetně povinných kontrol těsnosti před vykládkou a lepšího zajištění, aby nemohlo dojít k úniku ani v případě pádu lahví.[10] Tento incident také inicioval výzkum chování vodíkových úniků a jejich modelování v městském prostředí, což pomohlo při stanovení bezpečnostních odstupů a nouzových postupů.[11]

Železniční přeprava

Únik z cisternového vagónu, Aiserey, Francie (1992)

Dne 25. srpna 1992 byl na železniční stanici Aiserey zaznamenán únik kapalného vodíku z bezpečnostního ventilu železniční cisterny převážející cca 42 m³ zkapalněného vodíku.[12] Nákladní vlak o 10 vozech byl neprodleně zastaven a okolí cisternového vozu bylo evakuováno v okruhu několika set metrů a provoz na frekventované trati byl na několik hodin přerušen. Hasiči a technici nechali kontrolovaně odvětrat unikající vodík (který se rychle rozptýlil do ovzduší) a zabránili tak jeho případnému vznícení. K explozi ani zranění nedošlo. Po této události byly v rámci železniční přepravy nebezpečných plynů zpřísněny kontroly funkčnosti pojistných ventilů před jízdou a stanovena povinnost zastavit vlak při sebemenším podezření na únik kryogenního média. Přestože nehody při přepravě vodíku po železnici jsou vzácné (vodík se železnicí převáží jen výjimečně), incident v Aiserey ukázal, že i zde je klíčová důsledná příprava a vybavenost havarijních složek pro manipulaci s unikajícím vodíkem.

---

8 https://www.osha.gov/ords/imis/accidentsearch.accident_detail?id=200758365#:~:text=the%20cylinders,elbow%20below%20the%20roof%2C%20therefore

9 https://blog.cvn.com/2011/09/09/hydrogen-explosion-at-power-plant-results-in-a-6-9m-verdict#:~:text=A%20Marshall%20County%2C%20West%20Virginia,was%20entitled%20to%20attorney%20fees

10 https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14623417/#:~:text=appropriate%20scenarios,official%20accident%20report%20were%20used

11 https://www.yumpu.com/fr/document/view/16962253/annexe-liste-daccidents-au-format-pdf-706-ko-aria#:~:text=Une%20explosion%20se%20produit%20dans,br

12 https://www.yumpu.com/fr/document/view/16962253/annexe-liste-daccidents-au-format-pdf-706-ko-aria#:~:text=60.1Z%20

Potrubní přeprava

Exploze vodíkového potrubí, Woods Cross, Utah (2009)

Nehoda rozvodu vodíku nastala 4. listopadu 2009 v rafinerii Silver Eagle ve Woods Cross (poblíž Salt Lake City). Kvůli dlouhodobé vnitřní korozi prasklo potrubí o průměru 25 cm vedoucí vodík v jednom z technologických celků, což mělo za následek masivní únik vodíku a jeho okamžité vznícení a výbuch.[13] Tlaková vlna dosahovala do přilehlého obytného sídliště; poničila přes 100 okolních domů (rozbila okna, u dvou domů vážně narušila konstrukci). Ke ztrátám na životech nedošlo. Americký Chemický bezpečnostní úřad (CSB), zjistil, že potrubí na vodík nebylo po mnoho let inspektováno a zesláblo korozí natolik, že se protrhlo. Úřad zdůraznil, že rafinerie musí zlepšit programy mechanické integrity – nestačí spoléhat jen na inspekce, ale je nutné uplatňovat i principy bezpečnějšího projektování, které příčiny podobných selhání eliminují. Po nehodě provozovatel urychleně zkontroloval a vyměnil dotčené potrubí a zavedl pravidelné inspekce proti korozi. Úřady v reakci na tuto a podobné události (např. následný požár v Chevron Richmond 2012 či explozi v Tesoro Anacortes 2010) zpřísnily dohled nad korozními inspekčními programy rafinerií.
. Případ Woods Cross tak vedl ke zvýšení bezpečnosti potrubní přepravy vodíku – dnes se používají kvalitnější materiály odolné vůči vodíkové degradaci a pokročilé detekční systémy úniku, aby se předešlo podobným nehodám.

Požár vodíkového potrubí, Binnenmaas, Nizozemsko, 2007

Dlouho nezjištěná netěsnost vodíkového potrubí vedla k úniku plynného vodíku.
Tento oblak plynu se vznítil při nedalekých svářečských pracích a způsobil malý požár půdy pokrývající několik potrubí.
Únik z vodíkového potrubí byl způsoben kombinací faktorů napětí. Postupné sedání potrubí a okolní zeminy v průběhu několika let způsobilo ohýbání v pevných bodech, jako jsou přívody do budov. Tento ohyb namáhal blízkou spojku CP a nakonec způsobil únik. K nehodě přispěla také nepovolená těžká doprava a umístění těžkých zařízení na zeminu pokrývající potrubí.
Kromě toho byly povinnosti inspekce špatně koordinovány. Projevila se nedostatečná celková odpovědnost za bezpečnost, což zvýšila rizika spojená s provozem potrubí.

Požár vodíkového potrubí, Richmond, Kalifornie (1989)

V rafinerii Chevron Richmond došlo 10. dubna 1989 k havárii na vysokotlakém vodíkovém potrubí. Při odstavování hydrokrakovací jednotky selhal svar na přechodu potrubí (o průměru 2 palce) vedoucího vodík o tlaku cca 21 MPa.[14] Došlo k masivnímu úniku vodíku, který se ihned vznítil a vytvořil vysokoteplotní vodíkový plamen šlehající na zařízení v okolí. Oheň zasáhl nosnou konstrukci 30 m vysokého reaktoru. Následkem oslabení oceli žárem se těžký reaktor se zřítil a poškodil okolní technologie, což dramaticky zvýšilo rozsah škod. Několik osob utrpělo zranění, celkové škody přesáhly 90 milionů dolarů. Příčinou havárie byl materiálový defekt svaru v kombinaci s vodíkovou korozí. Následné šetření vedlo k důrazu na pravidelné kontroly stavu svarů a materiálu potrubí v prostředí s vodíkem – rafinerie zavedly programy pro

[13] https://www.csb.gov/-csb-releases-analysis-showing-cause-of-rupture-and-hydrogen-blast-in-2009-silver-eagle-refinery-accident-in-woods-cross-utah-pipe-walls-thinned-due-to-corrosion-that-went-uninspected-for-years-/#:~:text=The%20catastrophic%20rupture%20occurred%20in,was%20displaced%20off%20its%20foundation

[14] https://processsafetyintegrity.com/events/1989-04-10_richmond/#:~:text=A%20two,impingement%20on%20the%20calcium%20silicate

aktivní vyhledávání vodíkové koroze a vylepšily konstrukci potrubních systémů (např. používání odolnějších slitin, lepší izolace a monitorování úniků). Tato událost se stala poučením ohledně nebezpečí vysokotlaké vodíkové infrastruktury a vedla ke zpřísnění norem pro konstrukci potrubí přepravujících vodík.

Další události z databáze HIAD

Tabulka 2 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 3 Souhrn nehod z databáze HIAD, souvisejících s výrobou vodíku (upraveno v souladu s HIAD15)

UDÁLOST	POPIS UDÁLOSTI
SRÁŽKA S VOZIDLEM (PŘEPRAVA VODÍKU)	Srážka přepravní soupravy s vodíkem a osobního auta (1973). Nedošlo k úniku vodíku díky velmi robustní konstrukci nádrže.
ÚNIK Z TRUBKY PECE (PRŮMYSL)	Přehřátí pece způsobilo prasknutí potrubí s vodíkem (1975, USA). Únik bez požáru.
KOROZNÍ PRASKÁNÍ NÁDRŽE (SKLADOVÁNÍ)	Tlaková nádrž v Německu (1978) praskla vlivem vodíkové křehkosti svarů.
REAKCE CHEMIKÁLIÍ VE SKLADU (PŘEPRAVA)	Poškození nákladu vedlo k chemické reakci s tvorbou vodíku (1983, Kanada).
VÝBUCH LH2 NÁDRŽE (TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ)	Výbuch v kryogenní nádrži během testu kosmického zařízení (1991, Francie).
ÚNIK Z MANOMETRU (SKLADOVÁNÍ)	Prasknutí manometru vedlo k úniku stlačeného vodíku (1977, USA).
POŽÁR CISTERNY (PŘEPRAVA)	Požár cisterny s vodíkem (2006, USA), evakuace a chlazení LN2.
POŽÁR PO BLESKU (PRŮMYSL)	Blesk způsobil požár vodíku z ventilačního potrubí (2004, Německo).
NETĚSNOST VENTILU (RAFINERIE)	Únik vodíku z ventilu vysokotlaké nádrže (2006, USA).
ÚNIK NA PŘÍRUBĚ (SKLADOVÁNÍ)	Netěsná příruba vedla k úniku vodíku (2006, Francie).
VÝBUCH NÁDRŽE (CHEMICKÝ ZÁVOD)	Výbuch vodíkové nádrže (2004, Kanada).
EVAKUACE KVŮLI ÚNIKU (SKLADOVÁNÍ)	Únik vodíku z nádrže (2004, UK).
VÝBUCH SKLADU (CHEMIKÁLIE)	Exploze skladu s vodíkem, amoniakem a acetonem (2005, Malajsie).
VÝBUCH NÁDRŽE (TEPLÁRNA)	Výbuch nádrže v teplárně (2002, Kanada).
VODÍKOVÁ KŘEHKOST ŠROUBŮ (PRŮMYSL)	Praskání šroubů kvůli SSC (2003, Španělsko).
PÁD KRYONÁDRŽE (SKLADOVÁNÍ)	Pád nádrže s LH_2 (1997, Francie).

[15] *European Hydrogen Incidents and Accidents database HIAD 2.1, European Commission, Joint Research Centre* https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt

PORUCHA VENTILU KOMPRESORU (KOMPRESOROVNA)	Přetlak a prasknutí membrány s uvolněním vodíku (2006, EU).
ÚNIK LH2 (OCELÁRNA)	Únik kapalného vodíku z nádrže (1993, Francie).
VÝBUCH VE SKLADU (SKLADOVÁNÍ)	Výbuch ve skladovací jednotce (1978, EU).
VÝBUCH PŘI PRÁCI NA LAHVI (DÍLNA)	Výbuch lahve při mechanické opravě (2003, UK).
POŽÁR VODÍKOVÉHO POTRUBÍ (POTRUBNÍ PŘEPRAVA)	V roce 1989 v USA došlo k požáru na 2palcovém potrubí přepravujícím vodík. Příčinou byla netěsnost spoje.
EXPLOZE VODÍKOVÉ VÝROBNÍ JEDNOTKY (VÝROBA A SKLADOVÁNÍ)	V roce 1996 v Japonsku došlo k explozi v jednotce pro výrobu vodíku. Příčinou byla kombinace lidské chyby, pracovních faktorů a nedostatečného řízení.
VÝBUCH PŘI PŘEPRAVĚ VODÍKU NA NÁKLADNÍM VOZIDLE (SILNIČNÍ PŘEPRAVA)	V roce 1983 ve Švédsku došlo k výbuchu při přepravě vodíku otevřeným nákladním vozidlem kvůli selhání spojů.
EXPLOZE PŘI SVAŘOVÁNÍ (ÚDRŽBA A OPRAVY)	V roce 1994 v Kanadě došlo k explozi během svařování nerezového potrubí. V potrubí zůstaly zbytky vodíku.

Každá z uvedených nehod poskytla cenné ponaučení pro zvyšování bezpečnosti vodíkové infrastruktury. Ať už šlo o silniční přepravu, potrubní rozvody či stacionární zásobníky, detailní vyšetření příčin vedlo k úpravám konstrukcí, lepším materiálům, přísnějším kontrolám a změnám provozních postupů, které snižují riziko opakování podobných havárií. Vodík zůstává nebezpečnou látkou, pokud není správně zacházeno s jeho skladováním a přepravou, avšak průběžné zavádění bezpečnostních opatření – často právě v reakci na nehody – umožňuje jeho stále širší a bezpečnější využití v energetice a dopravě.

7.4. Hlavní příčiny nehod při skladování vodíku

Nehody při skladování vodíku mohou mít vážné následky vzhledem k unikátním vlastnostem vodíku jako vysoce hořlavého a reaktivního plynu. Porozumění hlavním příčinám těchto nehod je klíčové pro zlepšení bezpečnostních protokolů a prevenci budoucích incidentů.

1. **Selhání zařízení** Selhání zařízení je hlavní příčinou nehod souvisejících s vodíkem. Z téměř 350 hlášených incidentů v USA v letech 2000 až 2017 bylo selhání zařízení často uváděno jako pravděpodobná příčina, což zdůrazňuje nutnost přísných protokolů údržby a inspekce. Mezi běžná selhání patří:

    - Porucha pojistných ventilů může vést k přetlakovým situacím, které mohou způsobit prasknutí nebo výbuch.
    - Malé úniky v zásobnících nebo potrubních systémech mohou vytvářet výbušné atmosféry, zvláště pokud zůstanou neodhaleny po delší dobu.
    - Selhání vodíkových kompresorů může vést k tlakovým nerovnováhám a následným únikům nebo prasknutím.

2. **Konstrukční nedostatky**

   - Nedostatečné mechanismy odstraňování kyslíku v zásobnících mohou vést k nebezpečným směsím vodíku a kyslíku, což zvyšuje riziko výbuchu.
   - Absence prvků zabraňujících vzniku statické jiskry je kritická v prostředí, kde jsou přítomny hořlavé plyny. Konstrukce by měla zahrnovat techniky uzemnění a propojení, aby se zabránilo tvorbě statické elektřiny.
   - Špatně navržené větrací systémy mohou umožnit hromadění vodíku v uzavřených prostorách, což zvyšuje riziko vznícení.

3. **Lidská chyba**

   - Personál může ignorovat varování nebo alarmy signalizující zvýšené hladiny kyslíku nebo koncentrace plynů, což vede k nebezpečným situacím.
   - Nedostatečné školení v manipulaci s vodíkovými systémy může vést k nesprávným postupům během provozu nebo údržby.
   - Nedostatek jasné komunikace mezi členy týmu ohledně bezpečnostních protokolů a nouzových postupů může zhoršit rizika během kritických situací.

4. Kontaminace vodíku jinými plyny (např. kyslíkem) může vést ke vzniku mimořádné události. Například k incidentům dochází kvůli:

   - Tyto membrány nemusí účinně oddělovat kyslík od vodíku, což umožňuje tvorbu nebezpečných směsí.
   - Špatná kontrola kvality během výrobních procesů nemusí odhalit nečistoty ve vodíkových tocích, což vede k nebezpečným podmínkám.

5. **Vlivy prostředí**

   - Extrémní změny teplot mohou ovlivnit integritu materiálů a tlakové úrovně v zásobnících, což může vést k selhání.
   - Silné bouře nebo povodně mohou ovlivnit skladovací zařízení a vytvořit nebezpečné situace.

6. **Nedostatečná bezpečnostní opatření**

   - Absence dostatečných systémů detekce plynů, které rychle identifikují úniky, může vést k opožděné reakci a zvýšeným rizikům.
   - Nedostatek pravidelných bezpečnostních hodnocení a nouzových plánů přizpůsobených pro zařízení na manipulaci s vodíkem může snížit připravenost na možné incidenty.
   - **Nouzové vypínací systémy**: Nepřítomnost nebo nedostatečnost nouzových vypínacích systémů, které se automaticky aktivují za abnormálních podmínek, může zhoršit závažnost nehody.

7. **Problémy s dodržováním předpisů**

   - Zařízení, která nedodržují přísně zavedené bezpečnostní normy, mohou být náchylnější k nehodám kvůli nedostatečným bezpečnostním opatřením.

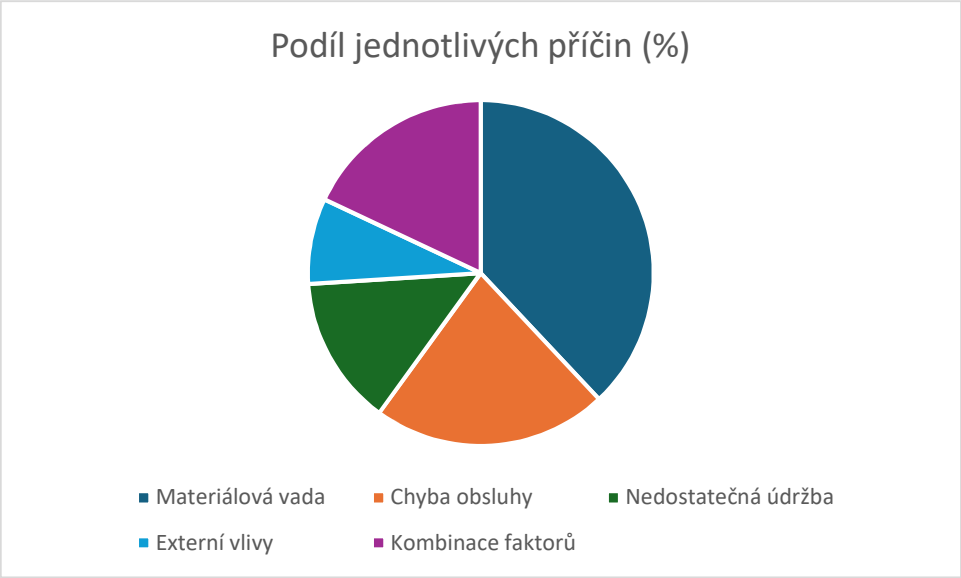
- V některých regionech může nedostatečný regulativní dohled umožnit přetrvávání nebezpečných postupů nebo zařízení bez dostatečné kontroly.

7.4.1. Hlavní příčiny nehod při přepravě vodíku

Hlavní příčiny nehod při přepravě vodíku lze rozdělit do několika klíčových oblastí. Tyto příčiny zdůrazňují inherentní rizika spojená s vodíkem jako palivem a důležitost přísných bezpečnostních opatření.

1. **Dopravní nehody**: Významný počet nehod spojených s vodíkem se vyskytuje během přepravy, zejména při použití nákladních vozů. Tyto nehody často vyplývají z vnějších faktorů, jako jsou srážky, převrácení nebo jiné dopravní problémy. Například z 97 zaznamenaných nehod při přepravě vodíku bylo 72 způsobeno dopravními incidenty.
2. **Selhání zařízení**: Mnohé nehody jsou způsobeny selháním klíčových komponentů, zejména kompresorů a dávkovačů na čerpacích stanicích. Nedostatečná údržba a nedostatky v provozních postupech často přispívají k těmto selháním. Poruchy zařízení mohou vést k nebezpečným únikům nebo dokonce k výbuchům během nakládky a vykládky.
3. **Nedostatečná údržba**: Špatné postupy údržby vozidel a infrastruktury mohou výrazně zvýšit riziko nehod. To zahrnuje poruchy tlakových uvolňovacích zařízení (PRD) nebo úniky způsobené korozí či vadami ve stavbě, jako je špatné svařování švů. Pravidelné inspekce a dodržování údržbových protokolů jsou zásadní pro prevenci těchto incidentů.
4. **Lidský faktor**: Chyby řidičů jsou významnou příčinou nehod, což zdůrazňuje potřebu řádného školení a povědomí o specifických vlastnostech vodíku. Řidiči musí být ostražití a v dobré fyzické kondici, aby bezpečně zvládali rizika spojená s přepravou vodíku.
5. **Statická elektřina a zdroje vznícení**: Hořlavost vodíku představuje riziko vznícení, zejména během nakládky a vykládky, kdy může statická elektřina zapálit úniky. Použití správných uzemňovacích technik během těchto operací je nezbytné pro snížení tohoto rizika.
6. **Problémy s řízením tlaku**: Přetlakování může vést k fatálním selháním skladovacích nádrží nebo přepravních cisteren. Nehody mohou nastat kvůli nesprávnému zacházení nebo nedodržení bezpečnostních předpisů týkajících se tlakových limitů.
7. **Podmínky prostředí**: Přeprava v hustě osídlených městských oblastech nebo za nepříznivého počasí může zvýšit rizika, což vede k větší pravděpodobnosti nehod kvůli snížené viditelnosti nebo nebezpečím na silnici.

Podíl příčin nehod je znázorněn na následujícím grafu. Při analýze příčin nehod spojených s přepravou a skladováním vodíku se ukazuje, že největší část těchto událostí je způsobena materiálovými vadami a konstrukčními problémy. Vodík má specifické fyzikálně-chemické vlastnosti, zejména schopnost pronikat do kovových materiálů a oslabovat jejich strukturu, což vede k vodíkové křehkosti a praskání. Spolu s tím se významně projevují i lidské chyby, především při manipulaci s tlakovými systémy, nesprávném ovládání ventilů nebo při nedostatečné kontrole těsnosti. Nezanedbatelnou roli hraje také podcenění pravidelné údržby, kdy dlouhodobě neřešené drobné závady přecházejí ve vážné technické selhání. Externí vlivy, jako jsou blesky, vibrace nebo teplotní šoky, tvoří menší, ale stále relevantní část příčin.



Obrázek 9: Počet nehod při přepravě a skladování vodíku

7.4.2. Závěry – poznatky a potřeby vyplývající z případových studií

Zmíněné databáze a jednotlivé případové studie nehod spojených s přepravou a skladováním vodíku ukazují, že navzdory technologickému pokroku a zpřísňování požadavků zůstává vodík z pohledu bezpečnosti vysoce rizikovou látkou.

Přestože každý z incidentů byl způsoben specifickou kombinací technických, organizačních nebo lidských selhání, lze identifikovat několik oblastí pro snížení rizika podobných nehod:

a) **Kritická role kvality materiálů a technologií**

   U řady případů došlo k selhání materiálu v důsledku **vodíkové křehkosti**, nesprávné volby materiálů nebo výrobních vad. To potvrzuje, že **materiálová kompatibilita s vodíkem** musí být v celém životním cyklu zařízení prioritou, od návrhu přes provoz až po údržbu. Zároveň je nutné klást důraz na **certifikaci komponent** (ventily, spoje, tlakové nádoby) s důrazem na testy pro dlouhodobý kontakt s vodíkem pod tlakem.

b) **Detekce a monitoring**
   Včasné odhalení netěsností a úniků vodíku zásadně ovlivňuje, zda situace zůstane pod kontrolou, nebo přeroste v havárii. Řada popsaných nehod ukazuje, že **absence nebo nefunkčnost monitorovacích systémů** vedla k eskalaci událostí. Moderní vodíková infrastruktura proto musí být vybavena **systémy kontinuální detekce vodíku**, a to i v těžko přístupných místech, jako jsou slepá ramena potrubí nebo příruby.

c) **Organizační faktory a řízení rizik**
   Vysoký podíl nehod souvisel s **chybami při provozu a údržbě** nebo s podceněním rizik při změnách technologie. Ukazuje se, že **Management of Change** je musí být nedílnou součástí řízení bezpečnosti. Každá změna v

systému přepravy nebo skladování vodíku (materiály, provozní parametry, nový postup) musí být analyzována z pohledu rizik.

d) **Prevence tvorby výbušné atmosféry**
Nehody, při nichž došlo ke **kontaminaci vodíku kyslíkem** (například Gangneung 2019), ukazují, že kritickým bezpečnostním prvkem je **zachování čistoty médií** v celém procesu. To zahrnuje nejenom vstupní kontroly plynu, ale i důsledné **proplachování a inertizaci** systému při každé odstávce nebo údržbě.

e) **Specifická rizika pro přepravu**
Silniční a železniční přeprava vodíku čelí specifickým výzvám spojeným s **mechanickými otřesy, vibracemi, teplotními změnami** a rizikem dopravních nehod. Případové studie ukázaly, že klíčové je:
- Robustní konstrukce transportních nádob, které vydrží mechanické zatížení.
- Zajištění ventilů a přírub proti nárazům a vibracím.
- Systémová detekce úniku během přepravy.
- Školení dopravců na specifika vodíku a havarijní postupy.

f) **Bezpečný návrh jako základ prevence havárií (Safety by Design)**
Analýza ukazuje, že řada havárií by mohla být **předem eliminována** vhodným návrhem zařízení nebo procesů. Inherentně bezpečnější design (např. minimalizace slepých ramen, volba materiálů s vysokou odolností vůči vodíku, eliminace atmosférických odvzdušnění uvnitř budov) je proto cestou, která by měla být prosazována jako součást projektové fáze každého vodíkového zařízení.

g) **Systémová zlepšení havarijní připravenosti**
V několika případech došlo ke **zdržení záchranných prací** kvůli nedostatečnému školení zasahujících jednotek na specifika vodíku (neviditelný plamen, rychlá disperze). Potřeba pravidelného školení **hasičů a záchranných složek** je proto dalším závěrem plynoucím z analyzovaných událostí.

8. Bezpečnostní opatření

8.1. Technická opatření - skladování

Technická opatření pro bezpečnost vodíkových technologií vycházejí jak z národních, tak zahraničních 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.
Skladování 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 zařízením jsou také dopravníkové, potrubní, popř. kabelové mosty, bez ohledu na to, zda mají ohraničující konstrukce. Norma stanoví obecný rámec požadavků z pohledu požární bezpečnosti.

Pro skladování vodíku (a dalších plynů) v tlakových nádobách stanoví požadavky norma ČSN 07 8304 Tlakové nádoby na plyny – Provozní pravidla.
Pro stavbu plnících stanic stlačeného vodíku platí TPG 304 03 Plnící stanice stlačeného vodíku pro mobilní zařízení, kde jsou uvedeny požadavky i na skladování v rámci plnících stanic.

8.1.1. 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.

8.1.2. 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 $kW \cdot m^{-2}$) nebo padajícími hořícími částmi konstrukcí objektu.
Při umisťování skladovacích technologií vodíku je nutné brát v úvahu požárně nebezpečný prostor stávajících objektů a otevřených technologických zařízení.
Dle předmětu normy ČSN 73 0804 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 4 Kapacita skladu nádob (přepočteno na nádoby o vodním objemu 50 litrů) (ČSN 07 8304)

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

Pro plnící stanice stlačeného vodíku stanoví TPG 304 03 bezpečné vzdálenosti od technologie (skladování se týkají vyžlucené položky):

Tabulka 5 Srovnání jednotlivých možností skladování vodíku v souladu 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
zdí 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 plnících stanic od ostatních objektů a zařízení plnící stanice stlačeného vodíku stanoví TPG 304 03, příloha 9:

Tabulka 6 Nejmenší odstupové vzdálenosti zdrojových zásobníků stlačeného vodíku od ostatních objektů a zařízení plnící stanice stlačeného vodíku dle 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

Podle ČSN EN ISO 21009-2 Kryogenické nádoby – Stabilní vakuově izolované nádoby – Část 2: Provozní požadavky, tabulka A.1 jsou pro zkapalněný vodík stanoveny tyto bezpečnostní vzdálenosti (hodnoty platí pro zásobníky vodíku do 5 tun):

Tabulka 7 Odstupové vzdálenosti pro kryogenické nádoby dle ČSN EN ISO 21009-2

Typ expozice	Bezpečnostní vzdálenost [m]
hranice oblasti pro parkování vozidel, veřejná silnice, železniční trať	8
oblasti, kde jsou povoleny otevřené plameny, kouření nebo zdroje zapálení	8
sklady pevných hořlavých materiálů, např. dřeva včetně dřevěných budov a staveb	8
jímky, potrubí, odtoky povrchové vody, otevírání systémů pod úrovní terénu	8
kanceláře, jídelny a oblasti, kde se zaměstnanci / návštěvníci shromažďují	15
přívod vzduchu do kompresoru / ventilátoru, ventil palivového plynu	15
sklad hořlavých kapalin	8
nadzemní elektrické kabely	10

Další bezpečnostní vzdálenost lze nalézt v dokumentu IGC Doc 06/02/E Bezpečnosti při skladování, manipulaci a distribuci kapalného vodíku (uvedené vzdálenosti lze dle uvedeného dokumentu redukovat, při dodatečné ochraně):

Tabulka 8 Odstupové vzdálenosti při skladování, manipulaci a distribuci kapalného vodíku dle GC Doc 06/02/E

	Položky	Vzdálenost [m]
1	Ohnivzdorné zdi s odolností 90 minut	2,50
2	Technické a neobývané budovy	10
3	Obsazené (obydlené) budovy	20
4	Sání vzduchových kompresorů, vzduchotechnika	20
5	Jakékoli hořlavé kapaliny	10
6	Jakékoliv hořlavé pevné látky	10
7	Jiné připevněné skladovací zařízení LH2	1,5
8	Jiná cisterna LH2	3
9	Uskladnění kapalného kyslíku	6
10	Uskladnění hořlavých plynů	8
11	Otevřený oheň, kouření, svařování	10
12	Místa, kde se shromažďují lidé	20
13	Veřejné organizace	60
14	Koleje, solnice, vlastnické organizace	10
15	Venkovní elektrické vedení	10

Všechna zařízení na skladování kapalného vodíku v provozovně uživatele musí být podle IGC Doc 06/02/E umístěna ve venkovních prostorech. Zařízení s kapalným vodíkem nesmí být umístěna v budovách. Pro podzemní zařízení by měly být zváženy další požadavky.

Další příklady lze nalézt v zahraniční. Navzdory mnoha pokusům určit kvantitativní vztahy mezi množstvím kapalného vodíku (LH_2) 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 3.
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[1],[2].

8.1.3. 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.

Logické návaznosti – nastavení
Provozovatelé provádějí vlastní bezpečnostní analýzy, nicméně analýzy nebezpečí by měli provádět i integrátoři 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 následující[3]:

- Izolace skladování volně loženého vodíku.
- Odpojení napájení od všech neklasifikovaných elektrických zařízení.
- Bezpečné odpuštění vodíku pod tlakem,
- Ventilační systém v uzavřených prostorách zůstane zapnutý.

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

8.1.4. 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 0875[4] a podle dalších norem.
Nutnost detekce vychází z projektového řešení a požadavků ČSN. V případě požadavku na instalaci elektrické požární signalizace musí být vždy zajištěna trvalá obsluha v počtu 2 osob nebo musí být zřízení zařízení dálkového přenosu (dále jen ZDP) na pult centralizované ochrany HZS ČR.
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.

8.1.5. 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.

8.1.6. 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.
Konstrukce zařízení větrající prostory z hořlavými plyny musí zabránit jejich vznícení (vznikem jiskry apod.).

8.1.7. Elektroinstalace

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

- 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.

Skladovací 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.

8.2. Technická opatření - při přepravě

Soubor bezpečnostních pravidel u skladování vodíku se v mnoha ohledech dotýká i přepravy. Dodatečná bezpečnostní opatření, která by měla být dodržována při přepravě vodíku jsou především:

Základní bezpečnostní opatření

1. **Použití schválených přepravních nádrží**:
   - Vodík přepravovat pouze v kontejnerech speciálně navržených pro jeho skladování, jako jsou tlakové lahve nebo kryogenní transportní jednotky, které vydrží tlak a teploty spojené s vodíkem.
2. **Správné větrání**:
   - Zajistit, aby přepravní vozidla a skladovací prostory byly dobře větrané, aby se zabránilo hromadění vodíku. Protože vodík je lehčí než vzduch, má tendenci stoupat, a proto by větrání mělo být zaměřeno na horní oblasti uzavřených prostor.
3. **Systémy detekce úniků**:
   - Instalovat spolehlivé systémy detekce úniků vodíku v přepravních vozidlech a skladovacích zařízeních. Tyto systémy by měly být dostatečně citlivé, aby rychle detekovaly i malé úniky, což umožní okamžitou reakci.
4. **Vzdálenost od zdrojů vznícení**:
   - Během přepravy udržovat bezpečnou vzdálenost od potenciálních zdrojů vznícení, jako jsou otevřené plameny, elektrické zařízení nebo místa se statickým výbojem.
5. **Pravidelné inspekce**:
   - Provádět rutinní inspekce přepravních vozidel a kontejnerů na známky opotřebení, koroze nebo poškození, které by mohly během přepravy vést k únikům nebo poruchám.
6. **Nouzové plány**:
   - Vypracovat a implementovat nouzové plány specifické pro incidenty při přepravě vodíku, včetně evakuačních tras a postupů pro řešení úniků nebo požárů.

Dodatečná bezpečnostní opatření

1. **Kompatibilita materiálů**:
   - Ujistěte se, že všechny materiály použité v přepravním systému (potrubí, ventily, tvarovky) jsou kompatibilní s vodíkem, aby se předešlo křehnutí a selhání v důsledku expozice vodíku.
2. **Dodržování předpisů**:
   - Přísně dodržujte místní, národní a mezinárodní předpisy upravující přepravu nebezpečných materiálů, včetně vodíku. To zahrnuje dodržování standardů organizací, jako jsou National Fire Protection Association (NFPA) a International Maritime Organization (IMO).
3. **Pokročilé monitorovací technologie**:

- Využívejte pokročilé monitorovací technologie, jako jsou senzory tlaku a teploty v reálném čase, které mohou upozorňovat na abnormální podmínky během přepravy.

4. **Bezpečné přepravní trasy**:
   - Pečlivě plánujte přepravní trasy, abyste se pokud možno vyhnuli obydleným oblastem, a zajistěte, že trasy budou prosté překážek, které by mohly během přepravy představovat rizika.
5. **Plamenové zábrany a tlakové pojistky**:
   - Vybavte přepravní kontejnery plamenovými zábranami a tlakovými pojistkami, aby se zabránilo výbuchům v případě úniků nebo přetlakových situací.

Bezpečná přeprava vodíku vyžaduje komplexní přístup zahrnující jak základní, tak dodatečná bezpečnostní opatření zaměřená na minimalizaci rizik spojených s tímto vysoce hořlavým plynem. Zavedením těchto opatření – od správného použití kontejnerů po pokročilé monitorovací technologie – mohou provozovatelé výrazně snížit pravděpodobnost nehod během přepravy vodíku. Neustálé školení, osvěta veřejnosti a dodržování předpisů jsou také klíčové pro zajištění bezpečnosti během celého procesu přepravy.

8.3. 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 zvládání 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.

8.3.1. 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 rozstřikem 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 a provozem skladu,
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 nářadí (ATEX),
e) popis externího a interního školení, zahrnující například vzdělávání „školitelů“ prostřednictvím CPD programů a interní školení zaměřená na personál.

Zapojovat do školení je třeba i personál zapojený do přepravy vodíku (především ohledně pochopení rizik, jejich rozpoznání a znalost jak si počít při mimořádné události.

8.3.2. 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 materiál[16]. Preventivní údržba je klíčová pro zajištění bezpečného skladování a prevenci nehod. Plán kontrol by měl stanovit priority na základě hodnocení rizik a zaměřit se na inspekci a údržbu primárně na komponenty s vysokým

[16] 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

rizikem, přičemž pro komponenty s nízkým rizikem vyžaduje menší údržbové úsilí, jak vyplývá také z kapitoly Řízení rizik a bezpečnostní opatření.

8.3.3. Business Continuity Management

Pro zajištění kontinuity provozu skladovacích zařízení v případě mimořádné události je klíčové uplatnit principy Business Continuity Managementu (BCM). Tento přístup se zaměřuje na:

- Identifikaci rizik spojených se skladováním vodíku, jako jsou úniky, tlakové výkyvy či požární nebezpečí.
- Návrh havarijních opatření včetně systémů detekce úniku, nouzového odvětrávání a bezpečnostních protokolů.
- Zajištění dostatečných zásob vodíku pro případ narušení dodavatelských řetězců či výpadku části skladovacích kapacit.
- Efektivní údržbu skladovacích zařízení, zahrnující pravidelné inspekce tlakových nádob, potrubních rozvodů a ventilačních systémů.
- Koordinaci s krizovými složkami (hasiči, integrovaný záchranný systém) pro rychlou reakci na mimořádné situace.

8.3.4. 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:
    - Například elektrolyzéry, které jsou klíčovým prvkem procesu a mohou být citlivé na opotřebení nebo výpadky.
    - 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)

8.3.5. Údržba technologie a predikce selhání

Pravidelná údržba významně ovlivněnu 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.

8.3.6. 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.

8.3.7. 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/)

9. Závěry

Historie vodíkové bezpečnosti sahá daleko do minulosti, od prvních pokusů se skladováním plynného vodíku v tlakových nádobách až po současné sofistikované technologie kryogenního skladování a související přepravy. Vodík je mimořádně lehký, vysoce reaktivní plyn, což z něj činí nejen slibný nosič čisté energie, ale také látku, jejíž manipulace a logistika vyžadují přísná bezpečnostní opatření.

Zkušenosti s bezpečným skladováním a transportem vodíku byly tradičně soustředěny do specializovaných průmyslových odvětví, zejména chemického průmyslu, metalurgie nebo letectví. S postupným nástupem vodíkového hospodářství se však vodík stává součástí energetické infrastruktury, což znamená jeho přítomnost v širším spektru aplikací a na větším množství míst, než tomu bylo v minulosti. Při pohledu na vývoj počtu nehod při dopravě nebo skladování vodku je patrný statistický růst. Ten však není dokladem zhoršující se bezpečnosti, ba naopak poukazuje na potřebu vývoje bezpečnostních opatření a zavedených řešení s technologickým a technickým pokrokem. Počet závažných nehod s fatálními následky má spíše klesající tendenci díky moderním bezpečnostním systémům a lepšímu řízení rizik.

Bezpečnost při skladování a přepravě vodíku proto vyžaduje systémový a mnohaoborový přístup, který zahrnuje mimo technická a provozní opatření i zapojení širokého spektra odborníků – od technologů, pracovníků logistiky, bezpečnostních specialistů, krizových manažerů, inspektorů až po zástupce veřejné správy a politiky.

Současný pohled na bezpečnost skladování a přepravy vodíku zohledňuje nejen fyzikální a chemické vlastnosti vodíku, ale i vnější faktory, jako je lokalizace skladovacích areálů, hustota osídlení v okolí nebo klimatické podmínky. Zvláštní pozornost je věnována integritě tlakových a kryogenních systémů, včasné detekci úniků, prevenci vzniku výbušné atmosféry a připravenosti na mimořádné události.

Vzhledem k očekávanému růstu využívání vodíku v energetice, dopravě i průmyslu bude komplexní bezpečnost skladování a přepravy vodíku klíčovým předpokladem pro jeho širší uplatnění. Tento dokument slouží jako první ze série průvodců, jehož cílem je poskytnout základní přehled technologií, rizik a bezpečnostních opatření spojených se skladováním a přepravou vodíku. Stejně jako se vyvíjejí technologie a regulační rámce, bude se vyvíjet i tento guideline, aby reflektoval nejnovější poznatky a zkušenosti.

10. Příloha A – Legislativní a regulační požadavky

10.1. Přehled legislativních požadavků souvisejících se skladováním a dopravou vodíku v České republice

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

§3 Podnikání v energetických odvětvích

§ 20b Energetické společenství a společenství pro obnovitelné zdroje

Zákon č. 283/2021 Sb. Stavební zákon

Příloha č. 2 k zákonu č. 283/2021 Sb. – Jednoduché stavby

- *k)* zásobníky pro zkapalněné uhlovodíkové plyny do celkového objemu 5 m^3 určené výhradně pro odběr plynné fáze,

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 - *bod 86* Zařízení ke skladování ropy nebo ropných produktů od stanoveného limitu a zařízení ke skladování chemických látek a směsí klasifikovaných jako nebezpečné v souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí s kapacitou od stanoveného limitu.

bod 87 Skladování zemního plynu nebo jiných hořlavých plynů s objemem zásobního prostoru od stanoveného limitu.

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. 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. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů
Zákon vymezuje obecnou ochranu přírody a kraji v rámci které mimo jiné stanovuje základní povinnosti vlastníků a správců pozemku.

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)

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. 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 nářadí na pracovištích v prostředí s nebezpečím výbuchu.

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.

10.2. Přehled norem v oblasti skladování a přepravy vodíků 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 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 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 zařízeni. 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
- 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 napění 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 62305-1: Ochrana před bleskem – část 1: Obecné principy

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

ČSN EN 62305-2: Ochrana před bleskem – část 2: Řízení rizik

- Účelem normy je poskytnout postup pro vyhodnocení rizika u staveb způsobeného údery blesku do země. Jakmile je vybrána horní přípustná mez rizika, umožňuje tento postup volbu vhodných ochranných opatření, které se musí přijmout pro snížení rizika na přípustnou mez nebo pod ní.

10.3. Příloha B – Příklady nehod s vodíkem ve světě

Název akce	Úplný popis akce	Systém iniciující událost	Klasifikace fyzických účinků	Povaha důsledků	Příčiny	Komentář k příčinám
Srážka s vozidlem 1973	Srážka vodíkového přívěsu s automobilem, bez úniku vodíku.	Událost, která nebyla způsobena vodíkovým systémem	Bez úniku vodíku	Téměř nehoda	Pracovní faktory Lidské faktory Faktory řízení	Díky robustní konstrukci přívěsu nedošlo při kolizi k poškození vodíkového systému.
Uvolnění z jádra, potrubí, armatur atd. 1975, USA	Únik z trubky pece způsobil nadměrné zahřátí trubky H2, což vedlo k jejímu prasknutí.	Událost, která vedla k aktivaci vodíkového systému	Uvolnění nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby	
Kontinuální únik z nádrže do otevřeného prostoru 1978, Německo	Vysokotlaká sférická nádoba, korozní namáhání vodíkem, únik podél svaru, únik směsi H2-CH4	Iniciační událost vodíkového systému	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby Chyba instalace	
Kontinuální únik v částečně uzavřeném prostoru 1983, Kanada	Poškození přepravních kontejnerů na lodi, reakce oxidu fosforečného s vínem vede ke vzniku kyseliny fosforečné a vodíku	Iniciační událost vodíkového systému	Nezapálené uvolnění vodíku	Únik bez vznícení	Chyba v konstrukci systému Pracovní faktory Faktory řízení	

Výbuch vodíku v zásobníku LH2 společnosti **1991, Francie**	Nehoda se stala v testovacím zařízení pro vesmírné vybavení. K vysokotlakému spalování u došlo v nádrži na kapalný vodík (H2) pod vysokým tlakem a za přítomnosti 12 m³ (700 kg) kapalného H2. Test byl zastaven, jakmile senzory zaznamenaly poruchu, a nedošlo tak k žádným následkům. Kryogenní nádrž s nominálním pracovním tlakem 250 barů byla připojena k nádržím na skladování H2 a kapalného kyslíku. Několik měsíců předtím byla testovací nádrž vyprázdněna a vyčištěna (vstřikováním helia), protože se předpokládalo, že síť H2 byla znečištěna v důsledku vniknutí vzduchu z kompresoru před rokem. V den nehody byl proveden test: nádrž s kapalným H2 byla natlakována ovládacím zařízením (na 250 barů za 30 sekund). Když tlak v nádrži dosáhl 160 barů, byl zaznamenán hluk signalizující	Iniciační událost vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Těsně minuta	Chyba v konstrukci systému Faktory řízení	

	pokles tlaku a detektory zaznamenaly kolísání tlaku o 10 barů. Náhlé a významné kolísání naměřených parametrů (teplota stěny, tlak, průtok) vedlo k ukončení zkoušky. Příčinou nehody bylo spalování zmrazeného kyslíku v slepé větvi odtokového potrubí nádrže. Jeho přítomnost byla pravděpodobně způsobena částečně neúspěšným propláchnutím heliem, které nedokázalo odstranit vzduch obsažený v slepé trubce, protože se nacházelo v dolní části nádrže. Zachycený vzduch se znovu zkapalnil při doplňování nádrže kapalným H2. Bylo zjištěno několik míst hoření: v kondenzované fázi mezi pevným O2 a plynným H2, v méně husté fázi mezi H2 a plynným O2. Hoření bylo nepochybně vyvoláno třením pelet o stěny a adiabatickou kompresí směsi plynů H2/O2.					

Únik z vodíkové nádrže 1977, USA	Z úložného systému unikl stlačený vodík v důsledku prasknutí tlakoměru typu Bourdon.	Událost, která vedla k úniku vodíku	Uvolnění nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby Chyba instalace Faktory řízení	Je známa pouze bezprostřední příčina.
Požár na cisterně s vodíkem 2006, USA	Hasiči evakuovali pracovníky z budovy Atmel a zřídili bezpečnostní zónu. Použili kapalný dusík. Největším nebezpečím byla možnost výbuchu.	Událost, která vedla k aktivaci vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Požár	Neznámý	
Požár způsobený bleskem 2004, Německo	Blesk způsobil požáry v závodě poblíž Hamburku poté, co zapálil únik vodíkové směsi přes ventilační potrubí.	Iniciační událost vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Požár	Chyba v konstrukci systému Pracovní faktory Faktory řízení	
Únik vodíku v rafinérii 2006, USA	Došlo k úniku z pojistného ventilu vysokotlakého zásobníku vodíku. K výbuchu ani požáru nedošlo.	Událost, která vedla k úniku vodíku	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba při instalaci Lidské faktory Faktory řízení	
Únik na přírubě zásobníku vodíku 2006, Francie	Na přírubě potrubí vedoucího z nádrže na vodík došlo k úniku vodíku. Personál byl uzavřen a byl spuštěn interní operační plán. Do nádrže bylo vpuštěno helium a operátor vybavený dýchacím přístrojem uzavřel ventil mezi nádrží a netěsnou	Iniciační událost vodíkového systému	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Lidské faktory Faktory řízení	Bezprostřední příčinou byla netěsná příruba.

	přírubou. Nikdo nebyl zraněn a nedošlo k žádným škodám.					
Výbuch vodíkové nádrže 2004, Kanada	V chemické továrně explodovala a vznítila se nádrž na vodík.	Iniciační událost vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Výbuch	Neznámý	
Únik z vodíkové nádrže 2004, Spojené království	Továrna byla evakuována poté, co z nádrže začal unikat vodík. Nebyly hlášeny žádné zranění.	Iniciační událost vodíkového systému	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby	Únik z vodíkové nádrže
Výbuch ve skladovacím prostoru chemického závodu 2005,Malajsie	Jeden zaměstnanec byl zraněn při výbuchu ve skladovacím prostoru chemického závodu, kde se nacházel amoniak, aceton a vodík.	Iniciační událost vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Výbuch	Neznámý	Výbuch ve skladovacím prostoru chemického závodu
Výbuch vodíkové nádrže 2002, Kanada	V tepelné elektrárně došlo k uzavřené explozi v nádrži na vodík	Událost spouštějící vodíkový systém	Únik vodíku a vznícení	Výbuch	Chyba materiálu/výroby	Výbuch v nádrži na vodík
Prasknutí šroubů v důsledku vodíkové křehkosti 2003, Španělsko	Šrouby na blíže nespecifikovaném průmyslovém zařízení selhaly po přibližně 4000 hodinách provozu (přibližně 18 měsících provozu). Jejich selhání způsobilo úniky H2S.	Událost, která vedla k poruše vodíkového systému	Žádné uvolnění vodíku	Téměř nehoda	Chyba materiálu/výroby	Příčinou byla porucha materiálu způsobená vodíkovou křehkostí. Tento mechanismus je známý jako SSC (Sulphide Stress Cracking, křehnutí

	Šrouby praskly v důsledku mechanismu vodíkové křehkosti (vodíkové trhliny) v atmosféře bohaté na H2S a za přítomnosti vlhkosti.					způsobené sulfidy). SSC je v podstatě jev vodíkové křehkosti, při kterém atomový vodík proniká do oceli a způsobuje její praskání. Jedná se o mechanismus, který může nastat, pokud se současně vyskytnou tři okolnosti: náchylný materiál, křehká atmosféra (H2S) a dostatečná úroveň napětí. Jedná se o mechanismus, který může nastat při mechanickém zatížení výrazně nižším, než je mez pružnosti materiálu, přičemž mohou stačit vlastní zbytková napětí z výroby nebo montáže. Náchylnost ocelí k vodíkovému křehnutí je tím větší, čím vyšší je jejich mechanická odolnost nebo tvrdost, přičemž pro martenzitické nerezové oceli s tepelným

						zpracováním kalením a popouštěním se používá referenční hodnota 26 HRC (v tomto případě měly šrouby tvrdost 48 HRC).
Porucha nádrže na kapalný vodík 1997, Francie	V chemickém závodě spadla nádrž se zkapalněným vodíkem. Nádrž obsahující 100 m³ kapalného vodíku byla instalována na betonové desce, která selhala. Vodík začal unikat z ventilu ve spodní části nádrže. Provozovatel vyhlásil stav nouze a zřídil bezpečnostní perimetr. Záchranáři použili pryskyřici k utěsnění úniku, poté ventil rozmrazili a uzavřeli.	Událost, která vedla k úniku vodíku	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby Lidské faktory Faktory řízení	
Únik z úložiště vodíku 2006, Evropská unie	Porucha zpětného ventilu kompresoru vodíku způsobila zvýšení tlaku mezi lahví s vodíkem a kompresorem na maximální povolený tlak 275 barg. V důsledku toho, jak předpokládal bezpečnostní systém, praskla pojistná membrána bezpečnostního ventilu a obsah vodíku z	Událost, která vedla k aktivaci vodíkového systému	Uvolnění a vznícení vodíku	Požár	Chyba materiálu/výroby	

	láhve s plynem a příslušné části potrubí unikl na střechu budovy. Plamen, který na několik okamžiků zahlédl strážný, mohl být způsoben postupným výskytem následujících událostí: - expanze vodíku na konci výfukového potrubí, - Následné smíchání vodíku a vzduchu až do téměř stechiometrického poměru a zvýšení teploty plynu - zapálení směsi jiskrami ze statické elektřiny vzniklé třením molekul plynu o suspendované prachové částice.					
Únik z nádrže na kapalný vodík 1993, Francie	V ocelárně došlo k úniku kapalného vodíku z nádrže o objemu 42 000 litrů. K zastavení úniku byla nainstalována těsnicí spojka.	Událost vedoucí k aktivaci vodíkového systému	Únik nezapáleného vodíku	Únik bez vznícení	Chyba materiálu/výroby	
Výbuch v jednotce pro skladování vodíku 1978, Evropská unie	Požár ve skladu vodíku. Vytržení vřetena uzavíracího ventilu tlakoměru (mohlo být zcela odšroubováno a odstraněno). Následný únik byl zapálen neznámým zdrojem. Žádné zranění	Událost vedoucí k aktivaci vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Výbuch	Chyba v konstrukci systému Chyba materiálu/výroby Faktory řízení	Vytržení hřídele uzavíracího ventilu tlakoměru (mohlo dojít k jeho úplnému odšroubování a odstranění). Následný únik byl zapálen neznámým zdrojem.

	personálu. Požár uhašen personálem stanice.					
Výbuch při práci s vodíkovou lahví 2003, Spojené království	Procesní operátor pracoval v oblasti nasazování/snímání objímek v mechanické dílně. K provedení dvou diagonálních řezů v objímce vodíkové láhve byla použita elektrická příčná pila, poté byla objímka odstraněna kladivem a sekáčem. Pokud se límec obtížně odstraňuje, používá se příležitostně také úhlová bruska.	Událost, která vedla k výbuchu vodíkového systému	Únik vodíku a vznícení	Výbuch	Lidské faktory Faktory řízení	Bezprostřední příčina: Zbylý vodík v lahvi se vznítil během mechanické práce Základní příčina: nedostatečné řízení rizikového u v průběhu celého procesu (nekontrolované vyprazdňování plynu).

11. Zdroje

1. Nasiru S. Muhammed, Afeez O. Gbadamosi, Emmanuel I. Epelle, Abdulrahman A. Abdulrasheed, Bashirul Haq, Shirish Patil, Dhafer Al-Shehri, Muhammad Shahzad Kamal, Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy, Journal of Energy Storage, Volume 73, Part D, 2023, 109207, ISSN 2352-152X, https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109207
2. B.L. Salvi, K.A. Subramanian, Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, 2015, Pages 1132-1155, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.030.
3. National Hydrogen Energy Road Map – 2006. Ministry of New and Renewable Energy (MNRE) 2006; Government of India.
4. M.A. DeLuchi, Hydrogen vehicles: an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts, and cost, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 14, Issue 2, 1989, Pages 81-130, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/0360-3199(89)90001-3.
5. B.L. Salvi, K.A. Subramanian, Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, 2015, Pages 1132-1155, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.030.
6. Changjong Kim, Sang Hoon Cho, Sung Min Cho, Youngseung Na, Sangwon Kim, Dong Kyu Kim, Review of hydrogen infrastructure: The current status and roll-out strategy, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 48, Issue 5, 2023, Pages 1701-1716, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.053
7. DoE. Skladování vodíku (2015). K dispozici na adrese: http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage
8. https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L3_HyResponder_Level4_CZ.pdf
9. 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
10. 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
11. 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.
12. 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.

Název:	Bezpečnost při skladování a transportu 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:	63
Vydala:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Neprodejné	

Tento průvodce obsahuje informace z oblasti bezpečnosti vodíku týkající se procesů a technologií jeho skladování a transportu. 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 978-80-248-4851-8 (on-line)

DOI 10.31490/9788024848518